

**Universidade Nova de Lisboa**  
**Faculdade de Ciências e Tecnologia**  
**Grupo de Disciplinas de Ecologia da Hidrosfera**

**Análise da influência da utilização de biocombustível num motor de combustão interna por compressão: desempenho, emissões de gases de escape e partículas totais em suspensão**

Luís Filipe Rosa Vital da Silva

**Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Bioenergia**

Orientadores: Professor Doutor Nuno Lapa

Professora Doutora Isabel Cabrita

**Lisboa**

**(2009)**



## DEDICATÓRIA

*À Belmira,  
João, Mário e Sofia*

Página Propositadamente Deixada em Branco

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Doutor Nuno Lapa, pela orientação desta tese, pelo rigor, profissionalismo, disponibilidade manifestada e críticas e sugestões resultantes.

À Doutora Isabel Cabrita, pela co-orientação desta tese, pela confiança demonstrada no projecto e pela disponibilidade dos recursos da Unidade de Emissões Zero do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, indispensáveis à realização do mesmo.

Ao Mestre David Salema, pelo apoio e disponibilidade que contribuíram para a concretização do presente projecto.

Ao Eng.º António Baeta Neves e à Eng.<sup>a</sup> Ana Teresa Crujeira pela disponibilidade sempre constante.

Ao Técnico António Cruchinho Nunes, pela disponibilidade na realização dos ensaios laboratoriais.

Ao Laboratório Nacional de Energia e Geologia pela disponibilidade dos recursos indispensáveis à realização do presente trabalho.

À Galp Energia, S.A. pela disponibilização do combustível e biocombustíveis.

À STRIX – Ambiente e Inovação pelo apoio.

Página Propositadamente Deixada em Branco

## RESUMO

Este projecto teve como objectivo estudar a influência da utilização de misturas de gasóleo de origem fóssil com biocombustíveis, de 15% e 30%, num motor de combustão interna por compressão, através da análise do seu desempenho (consumo específico e rendimento do motor) e emissões de gases de escape (NO<sub>x</sub>, CO, HC, CO<sub>2</sub>) e Partículas Totais em Suspensão (PTS) comparativamente ao gasóleo de origem fóssil.

Foram utilizados biocombustíveis provenientes da transesterificação (primeira geração) e da hidrogenação de óleos vegetais (segunda geração), num motor Mercedes OM615.940 (1,988 dm<sup>3</sup> cilindrada, 4 cilindros, 43 kW potência máxima a 4400 rpm, 108 Nm binário máximo a 2400 rpm), em três condições de ensaio distintas (1000 rpm e 0 Nm; 3000 rpm e 14,7 Nm; 3000 rpm e 58,8 Nm).

Verificou-se um incremento significativo no rendimento do motor quando se passou de potências baixas para potências médias, ao qual esteve associada uma diminuição do consumo específico e emissões específicas dos gases de escape e PTS das diferentes misturas estudadas e gasóleo de origem fóssil.

As misturas com incorporação de biocombustível de segunda geração apresentaram maior rendimento, menor consumo específico e menores emissões específicas de NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e PTS, a potências médias nas mesmas proporções, comparativamente às misturas com biocombustível de primeira geração. Comparativamente ao gasóleo de origem fóssil, a mistura com incorporação de 30% de biocombustível apresentou um rendimento e consumo específico semelhante, assim como menores emissões específicas de CO. A mistura com incorporação de 15% de biocombustível apresentou uma redução significativa da emissão específica de PTS. Estes resultados poderão dever-se à sua maior razão H:C, maior índice de cetano, inexistência de oxigénio na sua composição e menor viscosidade cinemática que contribuem para uma combustão mais completa.

Página Propositadamente Deixada em Branco



## ABSTRACT

The aim of this project was to study the influence resulting from the utilization of diesel blends, 15% and 30%, with biofuels in a internal combustion engine with ignition by compression (Diesel engine), by means of the analysis of his performance (brake-specific fuel consumption and thermal efficiency) and exhaust gases emissions (NO<sub>x</sub>, CO, HC, CO<sub>2</sub>) and Total Suspended Particles (TSP), when compared with diesel.

The experiments were conducted using biofuels produced from transesterification (first generation) and hydrogenation processes (second generation), in a Mercedes engine OM615.940 (a displacement of 1,988 dm<sup>3</sup>, 4 cylinders, a rated power of 43 kW at 4400 rpm and a rated torque of 108 Nm at 2400 rpm), under three different conditions (1000 rpm and 0 Nm; 3000 rpm and 14,7 Nm; 3000 rpm and 58,8 Nm).

It was observed a significant improvement in thermal efficiency, from low loads to medium loads, in association with a decrease in brake-specific fuel consumption, brake-specific exhaust gases emissions (NO<sub>x</sub>, CO, HC, CO<sub>2</sub>) and brake-specific TSP emissions of the different blends and diesel fuel.

The second generation biofuels blends presented an increase in thermal efficiency and a decrease in brake-specific NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> and TSP emissions, when compared with the first generation biofuels blends, for the same proportions at medium loads. When compared with diesel fuel, the 30% biofuel blend had a similar thermal efficiency and brake-specific fuel consumption, and also a decrease in the brake-specific CO emissions. The 15% biofuel blend had a presented a significative decrease in brake-specific TSP emissions. This can result from the highest H:C ratio and cetane index, no oxygen in his composition and lower kinematic viscosity, that contribute for a more complete combustion.

Página Propositadamente Deixada em Branco

## NOTAÇÕES

B	Binário
b.h.	Base húmida
b.s.	Base seca
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
COVNM	Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos
$C_s$	Consumo específico
DeCO <sub>2</sub>	Descarboxilação
ESC	“European Steady State Cycle”
EUDC	“European Extra-Urban Dryve Cycle”
FID	“Flame Ionization Detector”
GEE	Gases com Efeito de Estufa
HC	Hidrocarbonetos
HDO	Hidrodesoxigenação
HVO	“Hydrotreated Vegetable Oil”
ISP	Imposto sobre produtos petrolíferos e energéticos
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCI <sub>c</sub>	Poder Calorífico Inferior do combustível
PCI <sub>m</sub>	Poder Calorífico Inferior da mistura
PCS	Poder Calorífico Superior
P <sub>e</sub>	Potência efectiva
pme	Pressão média efectiva
PI	Ponto de inflamação

PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PTS	Partículas Totais em Suspensão
RGE	Recirculação de Gases de Escape
TSP	“Total Suspended Particles”
UE- 15	União Europeia a 15 Estados-Membros
UE- 27	União Europeia a 27 Estados-Membros
VC	Viscosidade cinemática
$\varnothing$	Riqueza da mistura ar-combustível
$\lambda$	Coeficiente excesso de ar

## ÍNDICE

Dedicatória.....	i
Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	v
Abstract.....	vii
Notações .....	ix
1 Objectivo .....	1
2 Introdução.....	3
3 Motores de Combustão Interna por Compressão .....	11
3.1.1 Ciclo Diesel.....	12
3.1.2 Parâmetros de funcionamento .....	15
3.1.3 Combustão nos motores de combustão interna por compressão .....	18
3.1.3.1 Parâmetros da combustão .....	21
3.1.3.2 Poluentes .....	23
4 Combustíveis .....	33
4.1 Gasóleo de origem fóssil.....	33
4.2 Biocombustíveis.....	34
4.2.1 Biocombustível de 1ª geração .....	35
4.2.2 Biocombustível de 2ª geração .....	42
4.2.3 Emissão de poluentes .....	44
5 Instalação Experimental e Métodos .....	47
5.1 Instalação experimental .....	47
5.1.1 Motor .....	47

5.1.2	Combustíveis.....	48
5.1.3	Amostragem de gases e partículas .....	50
5.1.4	Temperatura, pressão e humidade relativa .....	55
5.1.5	Diagrama geral do sistema de amostragem .....	57
5.2	Metodologia.....	58
5.2.1	Motor.....	60
5.2.2	Amostragem de gases e partículas .....	62
5.2.3	Temperatura, pressão e humidade relativa .....	70
5.2.4	Balanço de massa e eficiência térmica.....	71
5.2.4.1	Balanço de massa.....	71
5.2.4.2	Rendimento do motor .....	73
6	Resultados e Discussão .....	75
6.1	Potência.....	76
6.2	Consumo específico e rendimento do motor .....	76
6.3	Emissão de óxidos de azoto.....	80
6.4	Emissão de partículas totais em suspensão.....	86
6.5	Emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos .....	88
6.5.1	CO .....	91
6.5.2	HC .....	93
6.6	Emissão de dióxido de carbono .....	93
7	Conclusões .....	97
8	Trabalho Futuro.....	99
9	Bibliografia .....	101
10	Anexos .....	115
	Anexo 1 – Ácidos gordos e glicerol.....	115

Anexo 2 – EN 14214 .....	117
Anexo 3 – Registo da amostragem de gases (NO <sub>x</sub> , CO e O <sub>2</sub> ) .....	119
Anexo 4 – Registo da amostragem de PTS .....	124
Anexo 5 – Registo da amostragem de HC .....	129
Anexo 6 - Registo da amostragem da temperatura.....	133
Anexo 7 – Registo da amostragem do tempo de consumo .....	136
Anexo 8 – Resultados do balanço de massa.....	137
Anexo 9 – Registo fotográfico .....	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Variação da utilização do transporte rodoviário de carga entre 1990 e 2006, UE-15 (adaptado de EEAA, 2008 e EEAA, 2009) .....	4
Figura 2.2 - Variação da utilização do transporte rodoviário de passageiros entre 1990 e 2006, UE-15 (adaptado de EEAA, 2009) .....	4
Figura 2.3 – Evolução da emissão de GEE na UE-15, entre 1990 e 2006, provenientes do sector dos transportes (adaptado de EEAc, 2008).....	7
Figura 2.4 - Evolução da emissão de GEE na UE-27, entre 1990 e 2006, provenientes do sub-sector dos transportes rodoviários (adaptado de EEAc, 2008) .....	7
Figura 2.5 - Evolução do transporte rodoviário de passageiros em Portugal (adaptado de EEAA, 2009) .....	8
Figura 2.6 – Evolução da emissão de GEE (MtCO <sub>2</sub> eq) em Portugal, entre 1990 e 2005 (adaptado de APA, 2009) .....	9
Figura 2.7 - Evolução da emissão de poluentes atmosféricos a partir do transporte rodoviário em Portugal (adaptado de EEAb, 2009) .....	9
Figura 3.1 – Ciclo Diesel, diagramas P-V (pressão-volume) e T-S (temperatura-entropia) (Adaptado de Martins, 2006) .....	14
Figura 3.2 – Pontos mortos do motor (adaptado de Martins, 2006) .....	15
Figura 3.3 - 4 tempos do motor de combustão interna por compressão (adaptado de Martins, 2006) .....	16
Figura 3.4 – Curvas de binário, potência e consumo características de um motor de combustão interna por compressão (adaptado de Martins, 2006).....	17
Figura 3.5 - Geometria do cilindro (adaptado de Martins, 2006) .....	18
Figura 3.6 – Principais fases da combustão nos motores de combustão interna por compressão (adaptado de Martins, 2006).....	20
Figura 3.7 – Naftaleno (adaptado de Raimundo, 2007) .....	26
Figura 3.8 – Acenafteno (adaptado de Raimundo, 2007) .....	26



Figura 4.1 – Reacção de Transesterificação. $R_1$ , $R_2$ , $R_3$ representam cadeias de ácidos gordos. $k_1$ a $k_6$ representam as constantes de reacção. Adaptado de Cao <i>et al.</i> , 2008.	36
Figura 4.2 – Fluxograma geral do processo de produção industrial de biodiesel de 1ª geração (adaptado de Knothe <i>et al.</i> , 2004).....	39
Figura 4.3 – Evolução da produção de biodiesel na União Europeia a 15 e em Portugal (adaptado de EEAA, 2009).....	40
Figura 4.4 - Fluxograma geral do processo de produção de “Green Diesel”. PSA, “Pressure swing adsorption” que realiza a purificação e reciclagem do $H_2$ . Adaptado de Kalnes <i>et al.</i> , 2007 .....	43
Figura 5.1 - Detector de ionização de chama (FID) (adaptado de Zhang, 2007).....	53
Figura 5.2 – Esquema do conjunto utilizado na amostragem de PTS (adaptado de USEPA – “Method 5”) .....	55
Figura 5.3 – Esquema geral do sistema de amostragem utilizado.....	57
Figura 5.4 – Representação do local de amostragem de gases e HC. Figura adaptada de US EPA, método 1. $D_s$ , diâmetro do tubo de escape do motor de ensaio .....	62
Figura 5.5 – Diagrama geral da metodologia adoptada na recolha de amostras de $O_2$ , CO, $NO_x$ e $SO_2$ com o TESTO 350 e TESTO 339. Adaptado de LNEG, 2005 .....	64
Figura 5.6 – Diagrama geral da metodologia adoptada na recolha de amostras de HC com o 3030PM. Adaptado de Signal Group, 2003; US EPA, método 25A.....	65
Figura 5.7 - Amostragem de PTS (localização sonda/nozzle, porta-filtros, tubo de Pitot S e termopar k para monitorização da temperatura do efluente gasoso) na conduta. Figura adaptada de US EPA, método 1A. $D_s$ , diâmetro da conduta.....	68
Figura 5.8 - Diagrama geral da metodologia adoptada na amostragem isocínica de PTS. Adaptado de US EPA, método 1A; US EPA, método 2; US EPA, método 3; US EPA, método 4; US EPA, método 17.....	69
Figura 6.1 – Consumo específico médio ( $C_s$ ) nas condições II e III (as barras a preto indicam o desvio padrão).....	77

Figura 6.2 - Emissões médias de NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) corrigidas para um teor de 8% de O <sub>2</sub> e base seca (as barras a preto indicam o desvio padrão) .....	80
Figura 6.3 – Temperatura média dos gases de escape para cada mistura (as barras a preto indicam o desvio padrão) .....	81
Figura 6.4 - Emissões específicas médias de NO <sub>x</sub> (g/kWh) para as condições de ensaio II e III (as barras a preto indicam o desvio padrão) .....	82
Figura 6.5 - Variação da emissão de NO <sub>x</sub> (g/kWh) ao longo do período de amostragem (condição de ensaio III) .....	82
Figura 6.6 – Variação do teor de O <sub>2</sub> (%) nos gases de escape durante o período de amostragem (condição de ensaio III) .....	83
Figura 6.7 – Variação da temperatura (° C) dos gases de escape durante o período de amostragem (condição de ensaio III) .....	83
Figura 6.8 - Emissão de PTS (mg/Nm <sup>3</sup> ) corrigidas para um teor de 8% de O <sub>2</sub> e base seca .....	86
Figura 6.9 - Emissões específicas de PTS (g/kWh) para as condições de ensaio II e III .....	87
Figura 6.10 - Emissões médias de CO (mg/Nm <sup>3</sup> ) corrigidas para um teor de 8% de O <sub>2</sub> e base seca (as barras a preto indicam o desvio padrão) .....	88
Figura 6.11 - Emissões médias de HC (mgC/Nm <sup>3</sup> ) corrigidas para um teor de 8% de O <sub>2</sub> e base seca (as barras a preto indicam o desvio padrão) .....	89
Figura 6.12 - Emissões específicas médias de CO (g/kWh) para as condições de ensaio II e III (as barras a preto indicam o desvio padrão) .....	90
Figura 6.13 - Emissões específicas médias de HC (gC/kWh) para as condições de ensaio II e III (as barras a preto indicam o desvio padrão) .....	90
Figura 6.14 - Emissões específicas médias de HC (gC/kWh) para a condição de ensaio III (as barras a preto indicam o desvio padrão) .....	91
Figura 6.15 - Variação da emissão de CO (g/kWh) ao longo do período de amostragem (condição de ensaio III) .....	92

Figura 6.16 - Emissões médias de CO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) corrigidas para um teor de 8% de O <sub>2</sub> e base seca. ....	94
Figura 6.17 - Emissões específicas médias de CO <sub>2</sub> (g/kWh) para as condições de ensaio II e III.....	94
Figura 10.1 - Motor de combustão interna por compressão utilizado neste trabalho (OM615.940) .....	140
Figura 10.2 – Dinamómetro e banco de controlo da velocidade e binário.....	140
Figura 10.3 – Sistema de medição do consumo .....	140
Figura 10.4 - Equipamento utilizado na amostragem de gases (NO <sub>x</sub> , CO e O <sub>2</sub> ) e temperatura (gases de escape, cabeça do motor e entrada de ar no motor).....	141
Figura 10.5 - Equipamento utilizado na amostragem de HC .....	141
Figura 10.6 - Localização dos termopares de medição da temperatura (cabeça do motor e entrada de ar) .....	142
Figura 10.7 - Pormenor do local de amostragem de gases (NO <sub>x</sub> , CO, HC e O <sub>2</sub> ) e temperatura dos gases de escape .....	142
Figura 10.8 - Localização dos pontos de amostragem no âmbito da recolha de PTS .	142
Figura 10.9 – Equipamento utilizado na recolha de amostras de PTS .....	143
Figura 10.10 – Porta-filtros no ponto recolha de PTS.....	143
Figura 10.11 - Sonda e filtro utilizado na recolha de PTS .....	143
Figura 10.12 – Equipamento utilizado na medição da humidade relativa no local de entrada de ar no motor (TESTO 451).....	143

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2-1- Normas EURO em vigor e previstas para veículos ligeiros a gasóleo (adaptado de Conselho Europeu, 1998 e Conselho Europeu, 2007).....	5
Quadro 2-2 - Normas EURO em vigor e previstas para veículos pesados a gasóleo (adaptado de Conselho Europeu, 2005) .....	6
Quadro 3-1 - Evolução das máquinas térmicas (adaptado de Martins, 2006) .....	12
Quadro 3-2 - Mecanismo de redução utilizado em função do poluente (adaptado de Martins, 2006) .....	28
Quadro 4-1 - Comparação de parâmetros relevantes (valores médios) em óleos vegetais e gasóleo de origem fóssil. VC, viscosidade cinemática; IC, índice de cetano; PI, ponto de inflamação; PCS, poder calorífico superior (adaptado de Knothe <i>et al.</i> , 2005).....	35
Quadro 4-2 - Comparação de parâmetros relevantes (valores médios) em biocombustível e gasóleo. VC, viscosidade cinemática; IC, índice de cetano; PI, ponto de inflamação; PCS, poder calorífico superior; PCI, poder calorífico inferior (adaptado de (I) Knothe <i>et al.</i> , 2005; (II) Nils-Olof <i>et al.</i> , 2008) .....	44
Quadro 5-1 – Principais características do motor Mercedes OM615.940 .....	47
Quadro 5-2 - Características do banco de ensaio Zollner, modelo A-130, 4,1 kW .....	48
Quadro 5-3 – Principais propriedades dos combustíveis e respectivas misturas volumétricas utilizadas .....	49
Quadro 5-4 – Composição elementar dos combustíveis e respectivas misturas volumétricas utilizadas .....	50
Quadro 5-5 - Características de detecção do equipamento TESTO 350 (TESTO 350 – manual).....	51
Quadro 5-6 - Características do equipamento TESTO 339 (TESTO 339 – manual) ...	51
Quadro 5-7 - Características do 3030PM (Signal Group, 2003).....	53

Quadro 5-8 - Metodologia geral utilizada. A amostragem de PTS (partículas) foi realizada durante 25 minutos, a amostragem de G (gases) foi realizada durante 10 minutos. A sequência indicada foi realizada para os diferentes combustíveis.....	59
Quadro 5-9 – Nomenclatura utilizada na apresentação dos resultados .....	60
Quadro 5-10 - Descrição dos métodos US EPA nos quais se baseou a amostragem de PTS e os desvios e/ou notas do procedimento adoptado face aos mesmos.....	66
Quadro 6-1 – Datas de realização dos ensaios e respectivas condições ambiente existentes. HR, humidade relativa; T, temperatura; $P_{atm}$ , pressão atmosférica. ....	75
Quadro 6-2 - Datas de realização dos ensaios e respectivas condições ambiente existentes. HR, humidade relativa; T, temperatura; $P_{atm}$ , pressão atmosférica (continuação) .....	75
Quadro 6-3 – pme e potência observados em cada condição de ensaio.....	76
Quadro 6-4 – Rendimento do motor obtido em cada um dos ensaios.....	79
Quadro 6-5 - Diferenças verificadas entre as diferentes misturas (p=95%) na condição de ensaio III .....	84
Quadro 10-1 - Ácidos gordos mais comuns presentes em óleos e gorduras para produção de biodiesel (adaptado de Rosa, 2007) .....	115
Quadro 10-2 - Percentagem de ácidos gordos em óleos das culturas energéticas mais frequentes para a produção de biodiesel (adaptado de Knothe <i>et al.</i> , 2005).....	115
Quadro 10-3 - Principais propriedades do glicerol (adaptado de Knothe <i>et al.</i> , 2005) .....	116
Quadro 10-4 - Norma Europeia EN 14214 (adaptado de Knothe <i>et al.</i> , 2005 e Rosa, 2007).....	117
Quadro 10-5 - Norma Europeia EN 14214 (adaptado de Knothe <i>et al.</i> , 2005 e Rosa, 2007) (Continuação).....	118
Quadro 10-6 – Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de Gases .....	119

Quadro 10-7 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de Gases (continuação).....	120
Quadro 10-8 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de Gases (continuação).....	121
Quadro 10-9 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de Gases (continuação).....	122
Quadro 10-10 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de Gases (continuação).....	123
Quadro 10-11 – Dados obtidos durante a amostragem de PTS, no módulo de controlo, para B0 .....	124
Quadro 10-12 – Dados obtidos durante a amostragem de PTS, no módulo de controlo, para B15.1 .....	125
Quadro 10-13 – Dados obtidos durante a amostragem de PTS, no módulo de controlo, para B15.2 .....	126
Quadro 10-14 – Dados resultantes da pesagem dos “impingers”, para B0.....	127
Quadro 10-15 – Dados resultantes da pesagem dos “impingers”, para B15.1.....	127
Quadro 10-16 – Dados resultantes da pesagem dos “impingers”, para B15.2.....	128
Quadro 10-17 – Dados resultantes da pesagem dos filtros (B0, B15.1 e B15.2).....	128
Quadro 10-18 – Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de HC .....	129
Quadro 10-19 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de HC (continuação).....	130
Quadro 10-20 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de HC (continuação).....	131
Quadro 10-21 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de HC (continuação).....	132
Quadro 10-22 – Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem da temperatura dos gases de escape (°C) e temperatura ambiente na entrada de ar no motor (°C) .....	133

Quadro 10-23 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem da temperatura dos gases de escape (°C) e temperatura ambiente na entrada de ar no motor (°C) (continuação) .....	134
Quadro 10-24 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem da temperatura dos gases de escape (°C) e temperatura ambiente na entrada de ar no motor (°C) (continuação) .....	135
Quadro 10-25 – Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem do tempo consumo de 0,0476 dm <sup>3</sup> de combustível/biocombustível .....	136
Quadro 10-26 – Dados obtidos para o balanço de massa realizado (B0, B15.1, B30.1, B15.2 e B30.2).....	137
Quadro 10-27 - Dados obtidos para o balanço de massa realizado (B0, B15.1, B30.1, B15.2 e B30.2) (continuação).....	138
Quadro 10-28 - Dados obtidos para o balanço de massa realizado (B0, B15.1, B30.1, B15.2 e B30.2) (continuação).....	139





## **1 OBJECTIVO**

A mobilidade assume na sociedade actual um papel fundamental e transversal ao nível da sustentabilidade ambiental, económica e social. Um indicador da sua importância é o aumento ao longo dos últimos anos, em Portugal e na Comunidade Europeia, do transporte rodoviário de carga e passageiros. Torna-se, desta forma, necessário minimizar os efeitos negativos resultante do sector dos transportes, especialmente ao nível de poluentes atmosféricos e da emissão de Gases com Efeito de Estufa, sendo a introdução de biocombustíveis uma das medidas preconizadas neste âmbito.

O presente trabalho teve como objectivo estudar o efeito da incorporação de biocombustíveis em gasóleo de origem fóssil, através do estudo do desempenho de um motor de combustão interna por compressão, nomeadamente no consumo específico, rendimento do motor e na emissão de gases de escape ( $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{CO}_2$ , HC) e Partículas Totais em Suspensão (PTS).

Página Propositadamente Deixada em Branco

## 2 INTRODUÇÃO

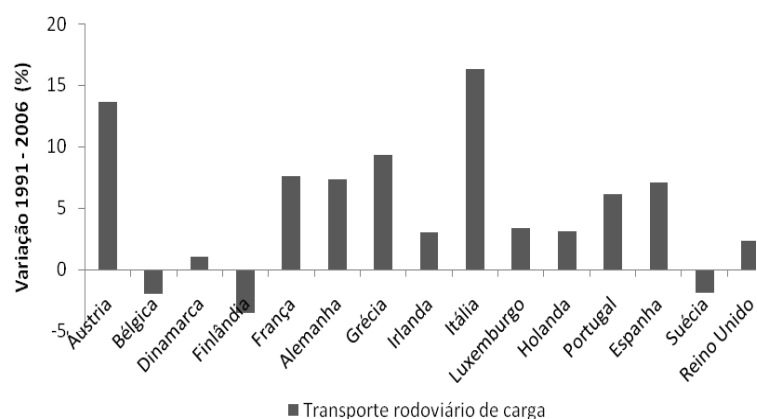
Na Europa, o consumo de energia associado ao sector dos transportes<sup>1</sup> tem vindo a aumentar, à semelhança do panorama mundial em que se verificou um aumento de 37% entre 1990 e 2004 (EEAa, 2008), sendo o incremento do número de automóveis um dos factores que mais contribui para este aumento. Considerando os Estados-Membros, UE-15, que assumiram compromissos ao abrigo do Protocolo de Quioto, o maior aumento verificado entre 1995 e 2006 no número de veículos automóveis por 1000 habitantes foi o da Grécia, cerca de 97% (407 veículos em 2006). Luxemburgo era o Estado-Membro que em 2006 apresentava o maior número de veículos automóveis por 1000 habitantes, nomeadamente 661 (EEAa, 2009).

O transporte de carga na UE-15, realizado pelo modo rodoviário, representou cerca de 79% do total de transportes efectuados nesta categoria durante o ano de 2006, tendo aumentado em quase todos os Estados-Membros no período compreendido entre 1990 e 2006, com excepção da Bélgica, Finlândia e Suécia (Figura 2.1). O transporte de passageiros (autocarro e veículos privados), para o mesmo grupo de Estados-Membros, passou de cerca de  $3.472,12 \times 10^6$  passageiros-km em 1990 para cerca de  $4.439,34 \times 10^6$  passageiros-km em 2006, um aumento de cerca de 28% (Figura 2.2) (EEAa, 2008; EEAa, 2009). Em termos de emissão de gases com efeito de estufa, o sector dos transportes na UE-27 e UE-15 registou um aumento de cerca de 27% e 26%, respectivamente, entre 1990 e 2006. No caso da UE-27, o sector dos transportes representava em 2006 cerca de 19% do total de emissões de GEE deste grupo de Estados-Membros, ou seja cerca de  $992,28 \text{ MtCO}_2\text{eq}^2$  (EEAc, 2008). No que respeita à UE-15, o sector dos transportes representava no mesmo ano, cerca de 21% do total de emissões de GEE, ou seja cerca de  $877,92 \text{ MtCO}_2\text{eq}$  (EEAc, 2008).

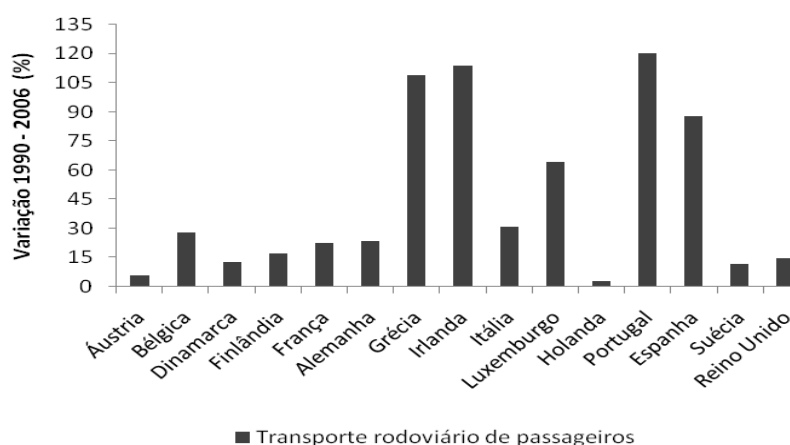
---

<sup>1</sup> Inclui transporte rodoviário, ferroviário e aviação nacional e doméstica, excluindo o transporte marítimo e aeronáutico internacional.

<sup>2</sup> Mega toneladas de dióxido de carbono equivalente.



**Figura 2.1 – Variação da utilização do transporte rodoviário de carga entre 1990 e 2006, UE-15 (adaptado de EEAA, 2008 e EEAA, 2009)**



**Figura 2.2 - Variação da utilização do transporte rodoviário de passageiros entre 1990 e 2006, UE-15 (adaptado de EEAA, 2009)**

No que respeita às emissões dos principais poluentes atmosféricos resultantes do transporte rodoviário, na UE-15 e para o período compreendido entre 1990 e 2005, verificou-se uma diminuição acentuada. Os  $\text{NO}_x$  diminuíram cerca de 42%, o CO diminuiu cerca de 68% e os  $\text{COVNM}^3$  (nos quais se incluem os hidrocarbonetos não metânicos) cerca de 74%. Não existem dados disponíveis para as partículas ( $\text{PM}_{10}$ ) (EEAb, 2008).

A política europeia no âmbito dos transportes foi iniciada em 2001 (CE, 2001). A sua revisão em 2006 veio indicar que seriam necessárias medidas mais abrangentes e

<sup>3</sup> Compostos orgânicos voláteis não metânicos;

flexíveis (CE, 2006), sendo em 2005 publicado o quadro estratégico da poluição atmosférica (CE, 2005). Neste âmbito, ao nível da emissão de poluentes atmosféricos, as normas EURO regulam as emissões resultantes dos veículos rodoviários. No Quadro 2-1 e Quadro 2-2 são apresentados os valores limites aplicáveis aos veículos ligeiros e pesados que utilizam como combustível o gasóleo. Adicionalmente a Comissão Europeia estabeleceu acordos com as associações de produção de veículos, de forma que os veículos ligeiros produzidos a partir de 2008/2009 não emitam mais de 140 gCO<sub>2</sub>/km, e que a partir de 2012 este valor não ultrapasse as 120 gCO<sub>2</sub>/km (EEAa, 2008).

**Quadro 2-1- Normas EURO em vigor e previstas para veículos ligeiros a gasóleo (adaptado de Conselho Europeu, 1998 e Conselho Europeu, 2007)**

Norma	Massa de Referência (MR, kg)	CO (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	HC + NO <sub>x</sub> (g/km)	PM (g/km)
EURO IV (> 1 Janeiro 2005)	M <sup>4</sup> : todas	0,500	0,250	0,300	0,025
	N <sub>I</sub> <sup>5</sup> : MR<1305	0,500	0,250	0,300	0,025
	N <sub>I</sub> : 1305<MR<1760	0,630	0,330	0,390	0,04
	N <sub>I</sub> : MR>1760	0,740	0,390	0,460	0,06
EURO V (> 1 Setembro 2009)	M: todas	0,500	0,180	0,230	0,005
	N <sub>I</sub> : MR<1305	0,500	0,180	0,230	0,005
	N <sub>I</sub> : 1305<MR<1760	0,630	0,235	0,295	0,005
	N <sub>I</sub> : MR>1760	0,740	0,280	0,350	0,005
EURO VI (> 1 Setembro 2014)	M: todas	0,500	0,080	0,170	0,005
	N <sub>I</sub> : MR<1305	0,500	0,080	0,170	0,005
	N <sub>I</sub> : 1305<MR<1760	0,630	0,105	0,195	0,005
	N <sub>I</sub> : MR>1760	0,740	0,125	0,215	0,005

<sup>4</sup> Veículos a motor destinados ao transporte de passageiros com pelo menos quatro rodas (DR, 2000);

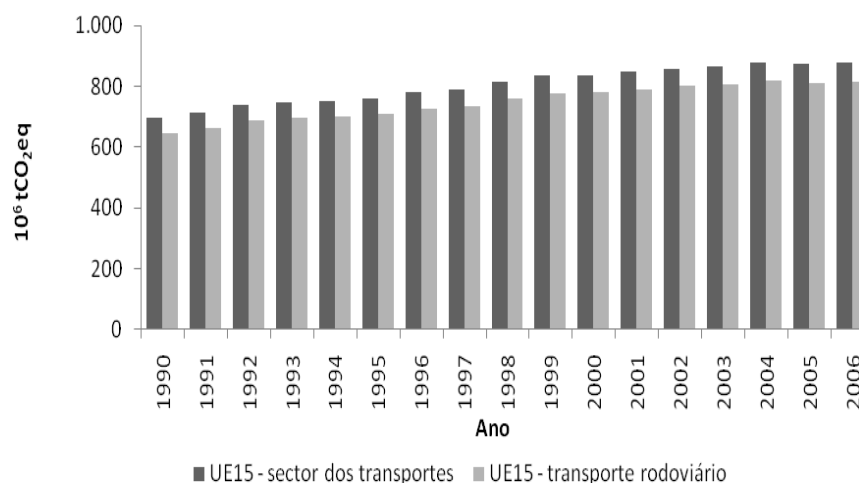
<sup>5</sup> Veículos destinados ao transporte de mercadorias, com massa máxima em carga tecnicamente admissível não superior a 3,5 toneladas (DR, 2000).

**Quadro 2-2 - Normas EURO em vigor e previstas para veículos pesados a gasóleo (adaptado de Conselho Europeu, 2005)**

Norma	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM
	(g/kWh)	(g/kWh)	(g/kWh)	(g/kWh)
EURO IV (> 1 Outubro 2005)	1,50	0,46	3,50	0,02
EURO V (> 1 Outubro 2008)	1,50	0,46	2,00	0,02

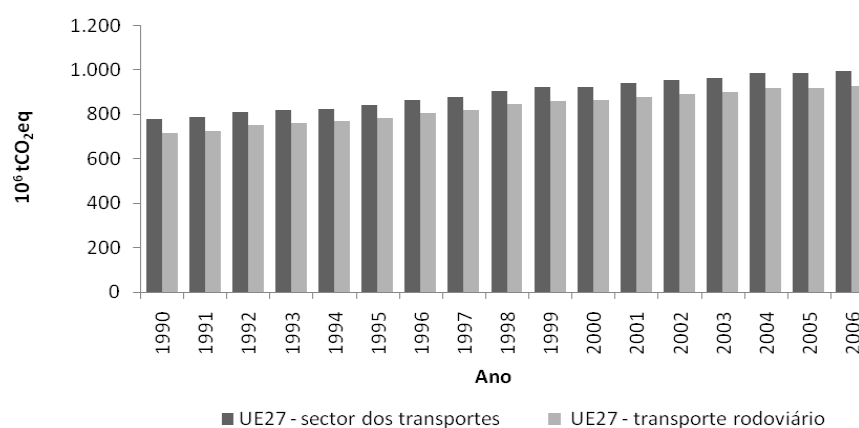
No que respeita à diminuição da emissão de GEE e poluentes atmosféricos, a actual política europeia centra-se sobretudo na utilização de biocombustíveis. A publicação da Directiva 2003/30/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 8 de Maio, estabeleceu a meta para os Estados-Membros de, até 31 de Dezembro de 2010, colocar no mercado 5,75% de biocombustíveis em toda a gasolina e gasóleo rodoviário (Conselho Europeu, 2003). Em 2008, aquando da apresentação de um conjunto de propostas legislativas sobre energia e alterações climáticas, a Comissão Europeia traçou o objectivo de aumentar a incorporação de biocombustíveis de 5,75% para 10% até 2020 (CE, 2008).

Na UE-15, a emissão de GEE provenientes do transporte rodoviário entre 1990 e 2006 aumentou cerca de 26%, atingindo em 2006 cerca de 814,14 MtCO<sub>2</sub>eq. Em 2006, a emissão de GEE a partir do transporte rodoviário representou cerca de 21% da emissão total na UE-15 e cerca de 93% das emissões provenientes do sector dos transportes (EEAc, 2008).



**Figura 2.3 – Evolução da emissão de GEE na UE-15, entre 1990 e 2006, provenientes do sector dos transportes (adaptado de EEAc, 2008)**

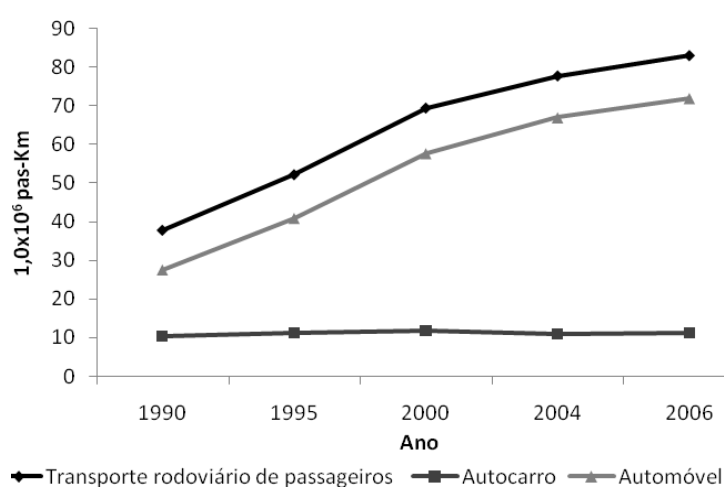
No caso da UE-27, a emissão de GEE provenientes do transporte rodoviário entre 1990 e 2006 aumentou cerca de 29%, atingindo em 2006 cerca de 924,18 MtCO<sub>2</sub>eq. Em 2006 a emissão de GEE a partir do transporte rodoviário representou cerca de 18% da emissão total na UE-27 e cerca de 93% das emissões provenientes do sector dos transportes (EEAc, 2008).



**Figura 2.4 - Evolução da emissão de GEE na UE-27, entre 1990 e 2006, provenientes do sub-sector dos transportes rodoviários (adaptado de EEAc, 2008)**

Portugal, comparativamente aos Estados-Membros da UE-15 e UE-27, apresenta um menor aumento do número de veículos automóveis por 1.000 habitantes para o período compreendido entre 1995 e 2006, cerca de 8%. Em 2006 este valor era de 405 veículos automóveis por 1.000 habitantes. O transporte rodoviário de carga em Portugal, representava em 2006 cerca de 95% do total desta categoria, um aumento de cerca de

3% face ao ano de 1991 (Figura 2.1). Relativamente ao transporte rodoviário de passageiros, este passou de cerca de  $37,78 \times 10^6$  passageiros-km em 1990 para cerca de  $83,17 \times 10^6$  passageiros-km em 2004, um aumento de cerca de 120% (Figura 2.2) (EEAa, 2008) (EEAa, 2009). Para os valores obtidos em Portugal contribuíram o aumento de cerca de 8% na utilização do autocarro e de 162% na utilização do automóvel, entre 1990 e 2006 (Figura 2.5). A este incremento encontra-se associado um aumento no consumo dos combustíveis rodoviários de origem fóssil<sup>6</sup>, de cerca de 82%, o que representou 6.471.489,2 toneladas em 2007<sup>7</sup> (DGEG, 2009).



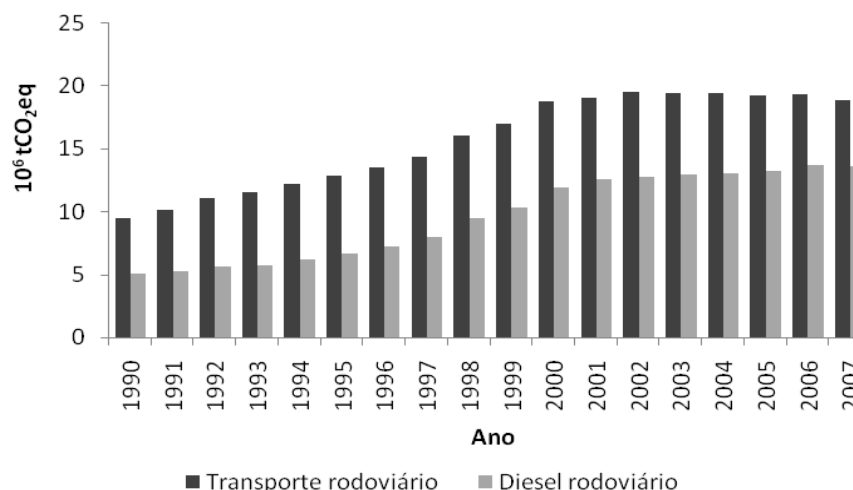
**Figura 2.5 - Evolução do transporte rodoviário de passageiros em Portugal (adaptado de EEAa, 2009)**

Em Portugal, a emissão de GEE directamente relacionados com o sector dos transportes aumentou cerca de 99%, entre 1990 e 2007, verificando-se a emissão em 2007 de 18,80 MtCO<sub>2</sub>eq. As emissões resultantes da utilização de gasóleo rodoviário aumentaram cerca de 168% no período compreendido entre 1990 e 2007, verificando-se a emissão em 2007 de 13,56 MtCO<sub>2</sub>eq (Figura 2.6), cerca de 72% do total emitido pelo sector dos transportes nesse ano (APA, 2009).

<sup>6</sup> GPL, gasolinas e gasóleos.

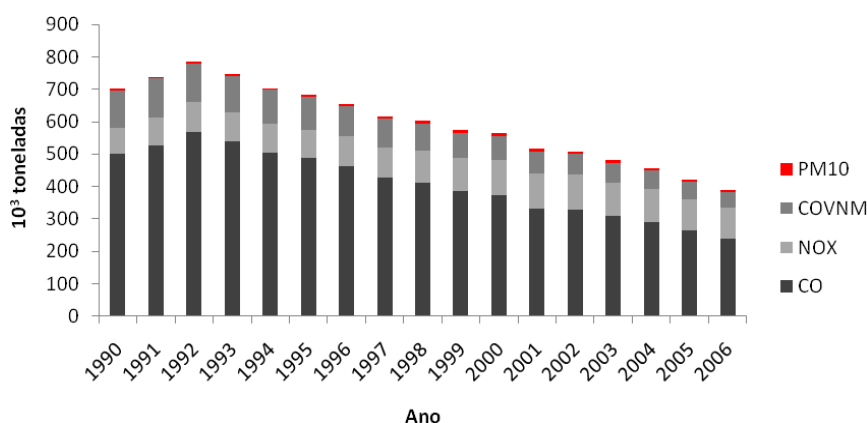
<sup>7</sup> Relativo ao consumo em Portugal Continental.





**Figura 2.6 – Evolução da emissão de GEE (MtCO<sub>2</sub>eq) em Portugal, entre 1990 e 2005 (adaptado de APA, 2009)**

Relativamente à emissão de poluentes atmosféricos, produzidos a partir do sector do transporte rodoviário, para o período compreendido entre 1990 e 2006, verificou-se um aumento dos NO<sub>x</sub> e PM<sub>10</sub> de cerca de 21% e 18%, respectivamente. Os COVNM e o CO registaram uma diminuição de cerca de 53% e 58%, respectivamente (Figura 2.7) (EEAb, 2009).



**Figura 2.7 - Evolução da emissão de poluentes atmosféricos a partir do transporte rodoviário em Portugal (adaptado de EEAb, 2009)**

As Directivas Europeias que definem as normas EURO actualmente em vigor para os veículos pesados e ligeiros foram transpostas para direito interno (DRa, 2000; DR, 2007). Em Portugal a estratégia de incorporação de biocombustíveis segue as metas delimitadas na Directiva 2003/30/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 8 de

Maio, tendo sido aumentado o objectivo do valor de incorporação de biocombustíveis para 2010, de 5,75% para 10% (DRa, 2006; DR, 2009). O Decreto-Lei n.º 49/2009, de 26 de Fevereiro estabelece como metas de incorporação de biocombustível para 2009 e 2010, o valor de 6% e 10 % em volume, respectivamente (DRA, 2009).

É fundamental, desta forma, aumentar o conhecimento relativo à combustão de biocombustíveis em motores de combustão interna por compressão.

### 3 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA POR COMPRESSÃO

O motor de combustão interna por compressão pode ser classificado como uma máquina térmica volumétrica alternativa. Térmica, uma vez que transforma a energia térmica, proveniente da combustão da mistura comburente-combustível no seio do fluido do motor, em energia mecânica útil; volumétrica, porque o fluido do motor evolui de forma pulsante numa cavidade de volume variável; e alternativa, porque o fluido evolui dentro de um cilindro de volume variável, transmitindo a sua energia à parede móvel desse cilindro, o que irá impulsionar o veio do motor (Martins, 2006).

Pode-se considerar que o início do desenvolvimento do motor de combustão interna por compressão remonta à invenção das armas de fogo, nas quais a energia térmica da explosão se transformava em trabalho. As primeiras referências de projectos com o intuito de produção de trabalho útil remontam a 1508, num esquema de Leonardo da Vinci, no qual este propôs realizar a elevação de um peso por meio de fogo. Em 1673, Christiaan Huygens propôs elevar um êmbolo dentro de um cilindro, utilizando para tal a explosão de pólvora (após o arrefecimento dos gases de combustão, o êmbolo descia no cilindro, exercendo pressão, o que provocava a elevação de água ou carvão) (Martins, 2006).

O início do desenvolvimento da tecnologia do motor de combustão interna por compressão, tal como existe hoje em dia, situa-se no século XIX, com William Priestman, Herbert Stuart e Emil Capitaine, os dois primeiros em 1885 e o último em 1890, os pioneiros da introdução da tecnologia que permitia queimar óleo. Em 1892, Rudolf Diesel registou a patente de um motor de combustão interna por compressão, propondo em 1893 o ciclo a pressão constante, conseguindo obter em 1895 um rendimento do motor de 26,2 %. Os motores de combustão interna por compressão começaram a ser comercializados em 1898 pela M.A.N. ("Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg") e Krupp (Martins, 2006). Os principais marcos tecnológicos na evolução das máquinas térmicas, entre o esquema de Huygens, em 1673, e a introdução da tecnologia de queima de óleos, em 1890, encontram-se indicados no Quadro 3-1.

**Quadro 3-1 - Evolução das máquinas térmicas (adaptado de Martins, 2006)**

Tipologia	Descrição
Motores a pólvora	A sua combustão não necessitava de ar. A pólvora apresentava um elevado custo e elevada perigosidade inerente ao seu manuseamento, possuindo uma baixa densidade energética (2,9 MJ/kg).
Máquina a vapor	Proposta por Denis Papin em 1679, evoluída por Thomas Savery, Thomas Newcomen e James Watt. Baseava-se num sistema em que um cilindro era cheio de vapor, existindo uma depressão quando o vapor condensava. James Watt, em 1769, introduziu um maior número de ciclos e um aumento de pressão.
Motores a ar	Motores de combustão externa, semelhantes aos motores a vapor, mas com utilização de ar quente em substituição do vapor, que permitiam um maior rendimento. Proposto inicialmente por Henry Hood em 1759, sendo realizados diferentes motores (George Caley, 1807; Robert Stirling, 1816; John Ericsson, 1826).
Motores a água (oxi-hidrogénio)	Datados de 1824, não chegaram a ser produzidos. Consistia na decomposição electroquímica da água, com consequente combustão do H <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> obtido dentro de um êmbolo. Este processo moveria o êmbolo, que voltaria à pressão inicial após a criação de vácuo, resultante da condensação do vapor de água proveniente da combustão.
Motores de combustão interna por compressão atmosféricos	Motores a gás, sem compressão prévia. Em 1794, Robert Barber apresentou uma máquina de êmbolo (funcionava com uma mistura de aguarrás e ar) e em 1805 Isaac de Rivaz apresentou um motor que montou num veículo (funcionava a gás de carvão). Foram evoluídos, entre outros, por Jean Lenoir, em 1861, e Nicolaus Otto, em 1864. Apresentavam pouca potência.
Motores com compressão prévia	Introdução do ciclo de 4 tempos (de compressão prévia), criando um motor multicilíndrico. Considera-se que Nicolaus Otto terá sido pioneiro desta técnica em 1876.

### 3.1.1 Ciclo Diesel

O funcionamento das máquinas térmicas baseia-se na primeira e segunda lei da termodinâmica. A primeira lei da termodinâmica (conservação da energia) postula que a variação infinitesimal de energia interna,  $dU$  (J), de um sistema é igual ao calor líquido absorvido,  $Q$  (J) subtraído do trabalho realizado pelo sistema,  $W$  (J), (Eq. 3.1<sup>8</sup>) (Alonso & Finn, 1999). Consoante se verifique uma compressão ou expansão, poderemos ter que:

$$dU = Q - W \quad \text{Eq. 3.1}$$

---

<sup>8</sup> Equação.

- Compressão: a variação de energia interna de um sistema é igual ao calor líquido absorvido, mais o trabalho externo realizado sobre o sistema;
- Expansão: a variação de energia interna de um sistema é igual ao calor líquido absorvido, menos o trabalho externo realizado pelo sistema.

Aplicando a primeira lei da termodinâmica a um ciclo motor (máquina térmica) com um rendimento hipotético de 100 %, obteríamos uma variação de energia interna nula, ou seja, o calor líquido absorvido pelo sistema seria igual ao trabalho realizado pelo mesmo (Eq. 3.2) (Alonso & Finn, 1999).

$$\Delta U_{ciclo} = 0 \Leftrightarrow Q = W \quad \text{Eq. 3.2}$$

A segunda lei da termodinâmica centra-se na entropia, definida como a grandeza que quantifica a absorção de uma quantidade de calor,  $dQ$  (J), durante uma transformação reversível infinitesimal, por um sistema à temperatura  $T$  (K) (Eq. 3.3). Para processos em sistemas isolados, cujos subsistemas ou componentes trocam calor, a variação da entropia total do sistema,  $\Delta S$  (J/K) permanece constante se os processos são reversíveis, aumentando quando os processos são irreversíveis, (Alonso & Finn, 1999), de acordo com a Eq. 3.4 (onde  $\Delta S_i$  corresponde à variação de entropia da componente  $i$  do processo).

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad \text{Eq. 3.3} \quad \Delta S = \sum_i \Delta S_i \geq 0 \quad \text{Eq. 3.4}$$

No caso de um ciclo motor (máquina térmica), uma vez que o sistema sofre uma transformação cíclica, regressando ao estado inicial, a variação de entropia é nula (Alonso & Finn, 1999). Um exemplo é o ciclo de Carnot, constituído por duas transformações isotérmicas e duas transformações adiabáticas reversíveis (Eq. 3.5).

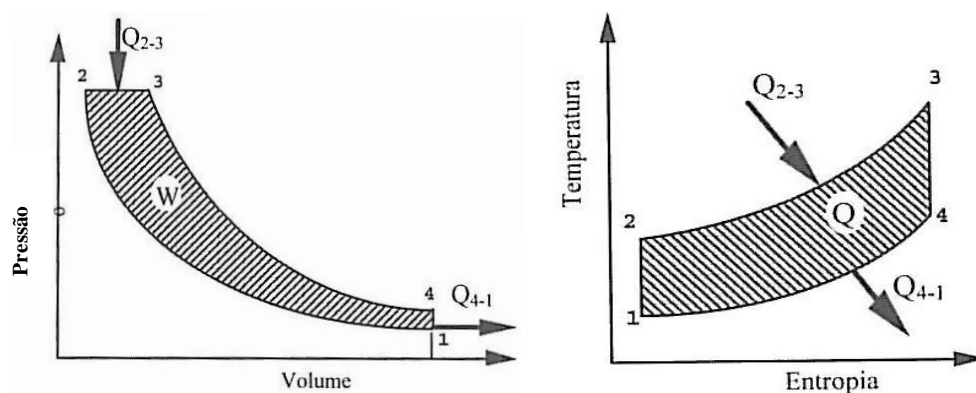
$$\Delta S_{ciclo} = 0 \Leftrightarrow \frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \quad \text{Eq. 3.5}$$

Desta forma, considerando que a eficiência (rendimento) de uma máquina térmica que funciona num ciclo reversível de Carnot é independente da substância utilizada e depende apenas das duas temperaturas de operação (teorema de Carnot), o rendimento de uma máquina térmica pode ser calculado pela Eq. 3.6 (Alonso & Finn, 1999; Martins, 2006). O rendimento é, desta forma, definido como a razão do trabalho total realizado,  $W$  (J) e o calor absorvido à temperatura mais elevada,  $Q_Q$  (J), por ciclo.

$$\eta_{MT} = \frac{W}{Q_Q} \quad \text{Eq. 3.6}$$

No ciclo dos motores de combustão interna por compressão o fornecimento de calor ocorre a pressão constante. No ciclo Diesel existem as seguintes transformações (Figura 3.1):

- Adiabática (isentrópica), 1 a 2, realização de trabalho sobre o sistema,  $W_{1-2}$ , aumentando a energia interna;
- Isobárica, 2 a 3, injeção de combustível, combustão não instantânea do mesmo com produção de calor a pressão constante (Eq. 3.7);
- Adiabática (isentrópica), 3 a 4, expansão do fluido com realização de trabalho pelo sistema,  $W_{3-4}$ , diminuído a energia interna;
- Isocórica, 4 a 1, perda de calor (Eq. 3.8).



**Figura 3.1 – Ciclo Diesel, diagramas P-V (pressão-volume) e T-S (temperatura-entropia) (Adaptado de Martins, 2006)**

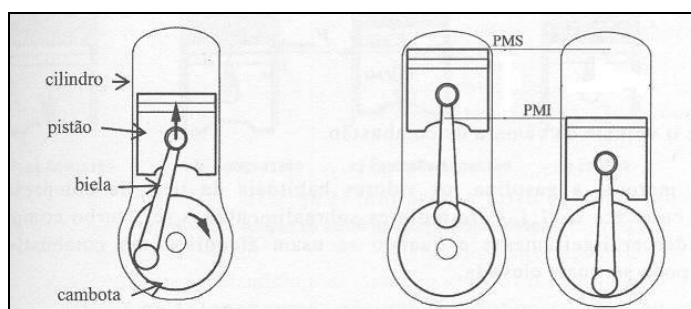
No caso do ciclo Diesel, o rendimento teórico irá depender da taxa de compressão e da quantidade de combustível injectado. Este último, é condicionado pelo excesso de ar,  $\lambda$ , pelo quociente entre a capacidade calorífica a pressão constante,  $C_p$  (J/ °C) e capacidade calorífica a volume constante,  $C_v$ ) do combustível, pela relação estequiométrica ar-combustível  $(A/F)_{est}$ , e pelo poder calorífico inferior do combustível  $PCI_c$  (kJ/kg), a pressão constante, calculado a partir da quantidade de combustível injectado num ciclo,  $m_c$  (kg) (Martins, 2006).

$$Q_{2-3} = C_p \times (T_3 - T_2) \quad \text{Eq. 3.7} \quad Q_{4-1} = C_v \times (T_4 - T_1) \quad \text{Eq. 3.8}$$

$T_3 \text{ e } T_2 \text{ em } ^\circ \text{C} \quad \quad \quad T_4 \text{ e } T_1 \text{ em } ^\circ \text{C}$

### 3.1.2 Parâmetros de funcionamento

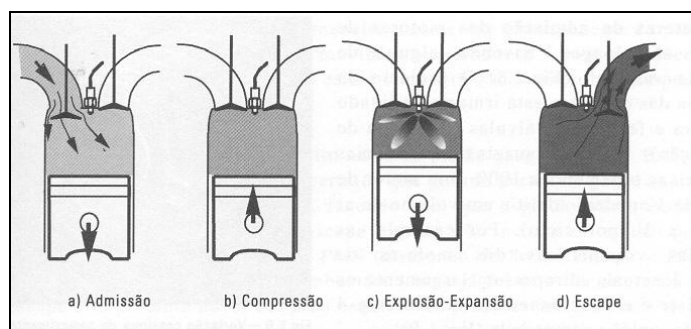
O princípio de funcionamento de um motor a combustão interna consiste na impressão de um movimento de rotação ao veio motor, resultante do aumento de pressão proveniente da combustão da mistura ar-combustível (mistura). O principal constituinte do motor são os cilindros (constituídos por êmbolos, bielas e cambotas). O movimento realizado por estes varia entre o Ponto Morto Superior (PMS), correspondente ao ponto mais alto que o êmbolo atinge dentro do cilindro, e o Ponto Morto Inferior (PMI), correspondente ao ponto mais baixo que o êmbolo atinge, tal como ilustrado na Figura 3.2 (Martins, 2006).



**Figura 3.2 – Pontos mortos do motor (adaptado de Martins, 2006)**

No seguimento do ciclo Diesel apresentado em 3.1.1, os quatro tempos do motor de ignição por compressão (gasóleo) são os seguintes (Figura 3.3):

- Admissão: o êmbolo parte do PMS, executando um movimento descendente até ao PMI. A válvula de admissão encontra-se aberta durante o movimento descendente, permitindo a entrada de ar;
- Compressão: com as válvulas de admissão e escape fechadas, o ar é comprimido até ao PMS;
- Explosão-expansão: com início no PMS, mas geralmente antes, existe a injeção de combustível no ar quente (na câmara de combustão<sup>9</sup>), com consequente inflamação, continuando este processo (injecção e combustão) durante a descida do êmbolo;
- Escape: abertura da válvula de escape, após chegada a PMI do êmbolo, permitindo a saída dos gases queimados durante a subida do êmbolo.



**Figura 3.3 - 4 tempos do motor de combustão interna por compressão (adaptado de Martins, 2006)**

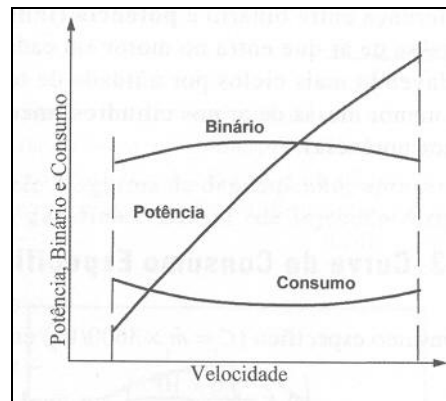
No presente trabalho são abordados, enquanto parâmetros dos motores, o binário, a potência e o consumo específico. O binário,  $B$  (N.m), denota a disponibilidade de uma força podendo indicar o trabalho potencialmente produzido pelo motor. A potência efectiva,  $P_e$  (W), é obtida pela multiplicação do binário (medido através de um veio dinamométrico) com a velocidade de rotação do motor,  $\Omega$  ou  $N$  (rad/s, ou rot/s, respectivamente) (Eq. 3.9). O consumo específico,  $C_s$  (g/kWh) é um indicador da transformação do combustível em trabalho, obtido pelo quociente do caudal de combustível,  $C_{comb}$  (g/h), e a potência efectiva do motor, ou seja, a taxa a que o trabalho é realizado (Eq. 3.10) (Martins, 2006).

<sup>9</sup> Espaço acima do êmbolo, quando este se localiza no PMS.



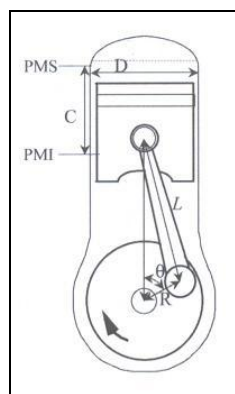
$$P_e = B \times \Omega = 2 \times \pi \times N \times B \quad \text{Eq. 3.9} \quad C_s = \frac{C_{comb}}{P_e} \quad \text{Eq. 3.10}$$

A curva do binário, potência útil e consumo específico, características de um motor de combustão interna por compressão, são apresentadas na Figura 3.4. Nos motores de combustão interna por compressão, o binário é baixo a rotações baixas e elevadas, devido aos avanços e atrasos das válvulas de escape e admissão e do aumento das perdas por atrito, respectivamente. A potência cresce rapidamente até ao binário máximo, devendo-se o seu aumento a partir desse ponto unicamente ao aumento de velocidade de rotação. O consumo específico é elevado para rotações baixas e altas devido às elevadas perdas térmicas e mecânicas, respectivamente (Martins, 2006).



**Figura 3.4 – Curvas de binário, potência e consumo características de um motor de combustão interna por compressão (adaptado de Martins, 2006)**

A potência de um motor pode ser afectada pelos parâmetros geométricos do mesmo. Entre os mais importantes está a taxa de compressão que pode ser reformulada em função da geometria do motor (Figura 3.5), correspondendo ao quociente entre o volume do cilindro no PMI,  $V_{PMI}$ , e o volume no PMS,  $V_{PMS}$ . Também importantes, são a relação diâmetro-curso do êmbolo,  $R_{DC}$ , quociente entre o diâmetro do cilindro,  $D$ , e a distância entre PMI e PMS,  $C$ ; relação comprimento da biela ( $L$ ) – raio ( $R$ ) da cambota,  $R_{BC}$  (Martins, 2006).



**Figura 3.5 - Geometria do cilindro (adaptado de Martins, 2006)**

Uma outra grandeza que é importante, aquando da comparação de motores de cilindrada diferente é a pressão média efectiva (pme). Esta corresponde ao trabalho efectuado por unidade de volume “varrido” do motor<sup>10</sup> ( $V_v$ ) (Martins, 2006).

$$pme = \frac{\pi \times B \times tm}{V_v} \quad \text{Eq. 3.11}$$

Pme, pressão média efectiva (Pa); tm, n.º de tempos do motor;  $V_v$ , m<sup>3</sup>; B, Nm

### 3.1.3 Combustão nos motores de combustão interna por compressão

A combustão é entendida como uma reacção química oxidativa, constituída por um conjunto de reacções químicas elementares com taxas de reacção diferentes, acompanhada pela libertação de calor ( $\Delta H^{11} < 0$  Joules) e emissão de luz (Chomiak, 1990; Turns, 2000; Coelho & Costa, 2007).

Nos motores de combustão interna por compressão a termodinâmica da combustão é influenciada principalmente pelo (Coelho & Costa, 2007) (Martins, 2006):

- Coeficiente de excesso de ar,  $\lambda$ , calculado como a razão real da massa de ar/combustível e a razão estequiométrica da massa de ar (kg) / combustível (kg);

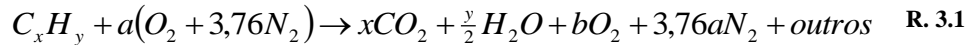
<sup>10</sup> Corresponde à cilindrada do motor, ou seja, à soma dos volumes entre o PMS e o PMI de cada cilindro.

<sup>11</sup> Variação da entalpia

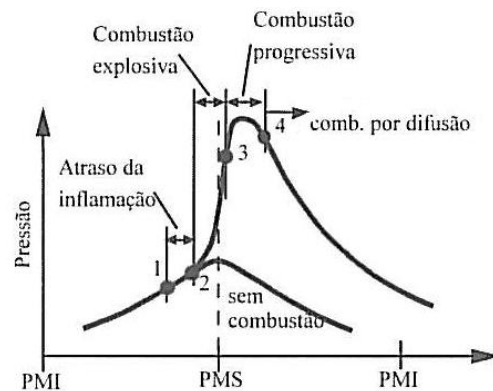
- Riqueza da mistura ou razão de equivalência,  $\phi$ , que indica a proporção arbitrária de oxidante e de combustível relativamente a uma mistura estequiométrica (ver Eq. 3.12);
- Poder Calorífico Inferior do combustível,  $PCI_c$  (kJ/kg);
- Poder Calorífico Inferior da mistura,  $PCI_{mist}$  (kJ/dm<sup>3</sup>). Pode ser calculado utilizando valores relativos ao  $PCI_c$  (kJ/kg), massa de combustível,  $m_c$  (kg), volume de ar,  $V_{ar}$  (dm<sup>3</sup>) e volume de combustível,  $V_c$  (Eq. 3.13);
- Variação da temperatura. Para temperaturas inferiores a cerca de 1.250 K e misturas pobres (elevada proporção ar/combustível) obtêm-se como produtos da combustão exotérmica espécies químicas estáveis (principalmente CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>), enquanto que para temperaturas superiores a cerca de 1.500 K ocorre dissociação das espécies químicas estáveis, formando-se muitas outras, tais como CO, H<sub>2</sub>, OH, H, O, NO e hidrocarbonetos não queimados, etc.

$$\phi = \frac{1}{\lambda} = \frac{\left(\frac{m_{ar}}{m_c}\right)_{esteq}}{\left(\frac{m_{ar}}{m_c}\right)_{real}} \quad \text{Eq. 3.12} \quad PCI_{mist} = \frac{(PCI_c \times m_c)}{V_{ar} + V_c} \quad \text{Eq. 3.13}$$

A alteração dos produtos obtidos aquando da combustão, após variação da temperatura, explica-se de acordo com o princípio de Le Chatelier, segundo o qual, o sistema tenderá a ajustar-se de forma a minimizar a perturbação causada pelo aumento da temperatura. Desta forma o aumento da temperatura conduz à formação de produtos secundários resultantes de reacções endotérmicas ( $\Delta H > 0$ ) que promovem a absorção de calor, conduzindo a um aumento da constante de equilíbrio, enquanto que a diminuição de temperatura promove a ocorrência de reacções exotérmicas (Chang, 1994). As reacções endotérmicas que ocorrem irão diminuir o rendimento do ciclo Diesel (Martins, 2006). Desta forma a combustão pode ser representada de acordo com a reacção química R. 3.1, em que a designação “outros” representa os poluentes formados (tais como NO<sub>x</sub> e CO) e a e b valores que possibilitam o acerto da queação (Coelho & Costa, 2007).



No motor de combustão interna por compressão (gasóleo), o combustível é injectado durante parte da compressão e expansão, existindo a auto-inflamação da mistura formada durante o processo heterogéneo. Durante a fase de compressão o ar eleva a sua temperatura até 973 K a 1.173 K e a uma pressão compreendida entre  $30,4 \times 10^5$  Pa e  $55,7 \times 10^5$  Pa. Nestes motores, a combustão pode ser dividida em quatro fases, nomeadamente o atraso na inflamação, combustão explosiva, combustão progressiva e combustão por difusão (Figura 3.6) (Martins, 2006).



**Figura 3.6 – Principais fases da combustão nos motores de combustão interna por compressão (adaptado de Martins, 2006)**

- Atraso na inflamação, é a denominação do espaço de tempo que ocorre entre a injeção do combustível, formação da mistura e a sua inflamação. Subdivide-se em atraso físico (transferência de calor, vaporização de gotas e mistura) e atraso químico (reações de oxidação lenta). Uma vez que a gama de temperaturas não é muito ampla, a velocidade de reacção,  $k$ , pode ser descrita pela equação de Arrhenius (Eq. 3.14). A taxa de combustão irá aumentar com o aumento da temperatura, sendo que o atraso físico dependerá da atomização do combustível, da taxa de aquecimento e da vaporização das gotas (ver ponto 3.1.3.1);
- Combustão explosiva, provoca um aumento brusco da pressão e temperatura, sendo influenciada pelas características, ou cinética, da injeção de combustível

(caudal, tipo de injector, avanço à injeção e pressão de injeção). Esta fase é bastante importante na formação de NO<sub>x</sub> e partículas;

- Combustão progressiva, ocorre a pressão quase constante, sendo a continuação da fase anterior de combustão explosiva, alimentada pela injeção de combustível no meio de ar muito quente (atraso de inflamação muito pequeno). Esta fase depende da difusão do combustível pela câmara, sendo influenciada pela taxa e forma de injeção do combustível, atomização e penetração do spray;
- Combustão por difusão, ocorre após a interrupção da injeção de combustível. Se o rendimento desta fase for diminuto, as elevadas temperaturas potenciarão a formação de NO<sub>x</sub>, existindo no entanto uma diminuição das partículas devido ao aumento da oxidação das mesmas.

$$k = A \times e^{\left(\frac{-E}{R \times T}\right)} \quad \text{Eq. 3.14}$$

A – factor de frequência; E, energia de activação (J/mol);

R – constante universal dos gases (8,314 J/mol.K); T, temperatura (Kelvin)

### 3.1.3.1 Parâmetros da combustão

A maioria dos parâmetros referidos neste ponto afecta principalmente a fase inicial da combustão nos motores de combustão interna por compressão, ou seja, o atraso da inflamação. Os parâmetros abrangidos são os relacionados com o sistema de injeção (atomização, ângulo e penetração do “spray” e quantidade de combustível injectado) cujo objectivo é o de criar uma mistura o mais homogénea possível resultante do “spray” que emite, mas também a turbulência, a taxa de compressão, os combustíveis, a pressão e a temperatura de admissão e a velocidade do motor (Martins, 2006).

No que respeita ao sistema de injeção:

- Uma atomização eficiente do combustível produzirá gotas de tamanho menor, aumentando a área superficial do combustível, reduzindo-se a fase correspondente ao atraso da inflamação (ver correlação para cálculo do diâmetro das gotas para gasóleo - Eq. 3.15) (Chalen & Baranescu, 1999);

- Quanto maior for a velocidade e o tamanho com que a gota entra no cilindro, após injeção e atomização, maior será a seu trajecto no cilindro, potenciando a utilização de todo o ar existente. Logo, é importante conhecer o diâmetro médio das gotas (“Sauter Mean Diameter” – SMD);
- Importa conhecer o ângulo do “spray” (ver correlação - Eq. 3.16). Geralmente o avanço de injeção, antes do PMS, situa-se entre os 10° a 15°, sendo que se o mesmo se verificar antes ou depois desta gama existirá um aumento na fase do atraso da inflamação (Chalen & Baranescu, 1999);
- Quanto maior for a quantidade de combustível injectado maior será a redução do atraso da inflamação devido à existência de combustões com maior gradiente de pressão.

$$d = A \times (P_{inj} - P_{cc})^{-0,135} \times \rho_{ar}^{0,121} \times V_f^{0,131} \quad \text{Eq. 3.15}$$

d, diâmetro médio das gotas (m); A, constante (injector de orifício:  $2,33 \times 10^{-3}$ ; injector de bico:  $2,45 \times 10^{-3}$ );  $P_{inj}$ , pressão de injeção (Pa);  $P_{cc}$ , pressão câmara de combustão (Pa);  $\rho_{ar}$ , massa volúmica do ar ( $\text{kg/m}^3$ );  $V_f$ , volume de combustível ( $\text{m}^3/\text{inj}$ ).

$$\theta = 0,05 \times \left[ \frac{D^2 \times \rho_{ar} \times (P_{inj} - P_{cc})}{\mu_{ar}} \right] \quad \text{Eq. 3.16}$$

$\theta$ , ângulo do “spray”; D, diâmetro do orifício de injeção (m);  $P_{inj}$ , pressão de injeção (Pa);  $P_{cc}$ , pressão câmara de combustão (Pa);  $\rho_{ar}$ , massa volúmica do ar ( $\text{kg/m}^3$ );  $\mu_{ar}$ , viscosidade do ar (Pa.s)

O aumento da turbulência do ar na câmara de combustão, criada por alterações nas condutas de admissão e/ou no êmbolo ou devido ao aumento da velocidade do motor, irá aumentar a transferência de massa e calor durante a formação da mistura, o que conduzirá a uma redução do atraso da inflamação (componente do atraso físico). Também o aumento da taxa de compressão, já descrita anteriormente como parâmetro geométrico condicionante da potência e rendimento do motor, irá reduzir o atraso da inflamação, ao que se associa o consequente aumento da produção de  $\text{NO}_x$  resultante do aumento da pressão e temperatura (Martins, 2006).

No caso dos combustíveis dos motores de combustão interna por compressão, a característica que mais influencia a combustão é o índice de cetano<sup>12</sup> (determinado por teste laboratorial – ISO 5165). Quanto maior o índice de cetano, menor será o atraso

<sup>12</sup> Na norma ASTM-D613 é designado por número de cetano.

da inflamação ou ignição (ver Eq. 3.17) (Knothe *et al.*, 2003; Knothe, 2005). Flores-Luque *et al.* (1987) indica que as principais propriedades dos combustíveis que afectam a eficiência da combustão (em especial o tempo de atomização e a eficiência desta, assim como o diâmetro das gotas formadas) são a densidade ( $\text{kg/m}^3$ ), viscosidade dinâmica (Pa.s) e a tensão superficial (N/m).

Outras propriedades importantes dos combustíveis que influenciam a combustão são a sua composição elementar (afecta a estequiometria da reacção de combustão), o calor latente de vaporização, o “flash point” (medida da flamabilidade do combustível), os limites de flamabilidade do combustível, a temperatura de auto-ignição/inflamação e o poder calorífico (quantificação da quantidade de energia química disponível no combustível) (Martins, 2006).

$$AI = \frac{1,512 + 840,15}{(IC - 3,547)^{1,52}} \quad \text{Eq. 3.17}$$

AI, atraso da inflamação ou ignição; IC, índice de cetano

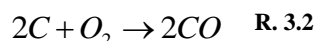
A diminuição da pressão e temperatura ambiente poderá diminuir, a jusante, a temperatura de admissão do combustível. Para valores de temperatura de admissão inferiores a 1.000 K existe um aumento do atraso da inflamação. Como indicado anteriormente esta situação pode ser compensada pelo aumento da taxa de compressão.

### 3.1.3.2 Poluentes

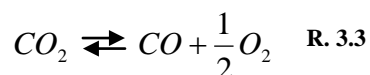
Durante a combustão poderá ocorrer, em maior ou menor extensão consoante as reacções químicas dominantes, a produção de diversos poluentes. Neste ponto são indicados quais os principais poluentes primários normalmente associados ao funcionamento dos motores de combustão interna por compressão, nomeadamente, monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto ( $\text{NO}_x$ ), hidrocarbonetos não queimados (HC) e partículas totais em suspensão (PTS), assim como os principais poluentes secundários formados na troposfera. Adicionalmente são resumidos os mecanismos de redução mais utilizados.

## Poluentes primários

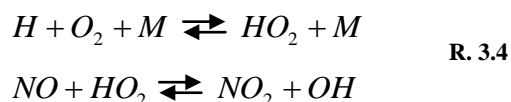
O CO é formado, principalmente, durante a combustão de misturas ricas (baixa proporção ar-combustível) e devido à dissociação do CO<sub>2</sub> (em condições de misturas estequiométrica ou pobre). Uma mistura rica,  $\phi > 1$ , irá promover a produção de CO devido à ausência de suficiente oxigénio para oxidar todos os átomos de carbono (combustão incompleta) (Ver reacção química R. 3.2) (Martins, 2006).



Em condições de mistura estequiométrica ou pobre,  $\phi \leq 1$ , com temperaturas superiores a 1250 K, como indicado anteriormente, poderá existir durante a combustão da mistura a dissociação do CO<sub>2</sub>, o que conduzirá à produção de CO (Ver reacção química R. 3.3) (Coelho & Costa, 2007).



No que se refere aos óxidos de azoto (NO + NO<sub>2</sub>), estes resultam, na sua maioria, das elevadas temperaturas atingidas na combustão, em especial na fase da combustão explosiva. Nos motores de combustão interna por compressão a principal fonte de NO<sub>x</sub> é o NO. Este pode formar-se por oxidação dos compostos de azoto presentes no combustível, devido à formação de radicais NH<sub>i</sub> (i = 0, 1, 2, 3) e à reacção destes com O<sub>2</sub> (Martins, 2006). O NO<sub>2</sub> pode ser formado a partir de reacções com radicais HO<sub>2</sub> (reacção química R. 3.4) em condições de temperaturas baixas (Coelho & Costa, 2007). A conversão de NO<sub>2</sub> em NO ocorre rapidamente em regiões de temperaturas elevadas (superiores a cerca de 1.500 K), associadas a misturas ricas ( $\phi > 1$ ) e com concentrações elevadas de H e O (ver reacção química R. 3.5) (Coelho & Costa, 2007) (Martins, 2006).



M, terceira molécula inerte que estabiliza a reacção

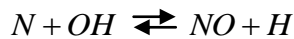
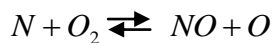
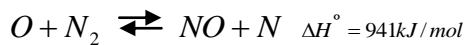




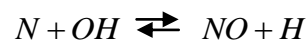
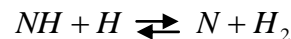
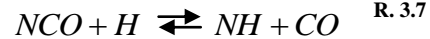
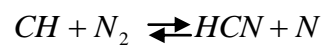


Não obstante, a maior fracção de NO é produzida a partir do azoto molecular (N<sub>2</sub>) presente no ar de combustão, através dos seguintes mecanismos (Coelho & Costa, 2007):

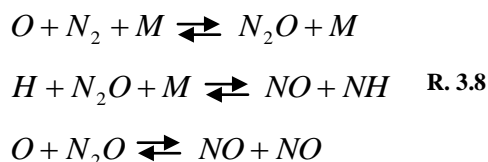
1. Mecanismo térmico, ocorre a temperaturas superiores a 1.800 K, é dominante em chamas de difusão turbulenta de hidrocarbonetos, sendo caracterizadas pelo mecanismo de Zeldovich estendido (reacção química R. 3.6). Este mecanismo depende da temperatura, da concentração local de O<sub>2</sub> e do tempo de residência em zonas com elevadas temperaturas;
2. Mecanismo imediato (Fenimore), ocorre principalmente na presença de misturas ricas,  $\phi > 1$ , envolve reacções de radicais de hidrocarbonetos com N<sub>2</sub>, que originam compostos de ciano, que após sofrerem novas reacções originam NO. A reacção química R. 3.7 representa o conjunto de reacções que mais contribuem para este mecanismo (ignorando os mecanismos que conduzem à formação do radical CH);
3. Mecanismo intermédio com óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), importante na formação de NO em condições de baixas temperaturas associadas a chamas de pré-mistura,  $\phi \leq 0,8$  (ver R. 3.8).



R. 3.6

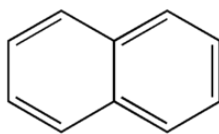


$\Delta H^\circ$ , energia de dissociação

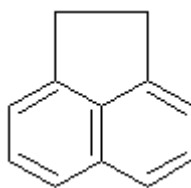


M, terceira molécula inerte que estabiliza a reacção

Os hidrocarbonetos não queimados (HC), pertencentes à categoria dos compostos orgânicos voláteis<sup>13</sup> (COV), podem resultar da combustão incompleta da mistura (principalmente em misturas ricas), do óleo do motor e de fugas de pressão pela válvula de escape durante a compressão e explosão. Nos motores de combustão interna por compressão a maioria dos HC provêm do combustível que fica retido no bico do injector (Martins, 2006). Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's)<sup>14</sup> mais frequentes nos gases de escape dos motores de combustão interna por compressão são o naftaleno e o acenafteno (Figura 3.7 e Figura 3.8). A este respeito foram já identificados cerca de 32 HPA's diferentes, resultantes da combustão em motores de combustão interna por compressão (Tong *et al.*, 1984).



**Figura 3.7 – Naftaleno (adaptado de Raimundo, 2007)**



**Figura 3.8 – Acenafteno (adaptado de Raimundo, 2007)**

O principal volume de partículas (sólidas ou líquidas em suspensão no gás de escape do motor) forma-se nas regiões ricas de uma chama (onde a mistura local é rica), caracterizadas por elevadas temperaturas, injeção excessiva de combustível e baixas

<sup>13</sup> Compostos orgânicos que evaporam à sua temperatura de utilização (IPCC, 2005); composto orgânico cujo ponto inicial de ebulição, à pressão normal de 1 atm (101,3 kPa), seja inferior ou igual a 250 °C (523,15 K) (DR, 2006); uma substância cuja pressão de vapor a 20 °C (293,15 K) é inferior à pressão atmosférica normal (101,3 kPa) e maior do que 130,0 Pa (Hester, 1995).

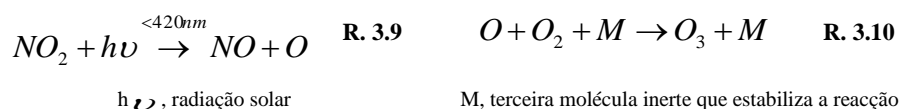
<sup>14</sup> Hidrocarbonetos constituídos por dois ou mais anéis aromáticos (benzénicos) (Vallero, 2008).

concentrações de oxigénio, variando entre 0,02 µm e 0,12 µm (Coelho & Costa, 2007; Martins, 2006). Adicionalmente formam-se, em menor quantidade, partículas resultantes da queima de óleo de lubrificação (diâmetro aproximado de 0,5 µm) e de combustível não queimado associado à inexistência de combustão ou temperaturas baixas (diâmetro aproximado de 1,3 µm) (Martins, 2006).

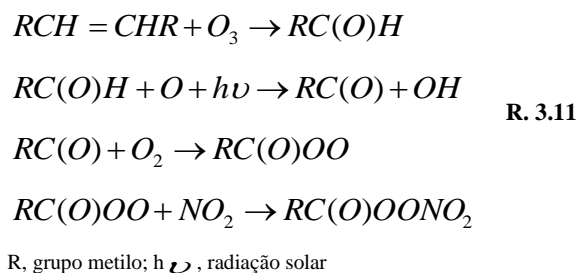
### Poluentes Secundários

Os principais poluentes secundários formados na troposfera são oxidantes fotoquímicos, tais como o ozono (O<sub>3</sub>) e o nitrato de peroxiacetilo [CH<sub>3</sub>C(O)OONO<sub>2</sub>]. Adicionalmente poderá formar-se ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) e ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) que afectam a biosfera na forma de chuvas ácidas (Chang, 1994).

A formação de O<sub>3</sub> realiza-se a partir das moléculas de NO<sub>2</sub>. Embora este também resulte da combustão nos motores de combustão interna por compressão (ver reacção química R. 3.4) a maioria forma-se na troposfera após um conjunto de reacções que envolvem o NO e O<sub>2</sub>. Para comprimentos de onda inferiores a 420 nm, dá-se a formação fotoquímica de O<sub>3</sub> troposférico (ver reacção química R. 3.9 e R. 3.10) (Finlayson-Pitts & Pitts Jr *et al.*, 1997). Em condições normais existiria a dissociação do O<sub>3</sub> troposférico, pela reacção deste com NO. Na realidade existe uma acumulação de O<sub>3</sub> troposférico, devido à maior afinidade do NO com outras moléculas, como é o caso dos hidrocarbonetos (Albert, 1988).



Para além da formação de O<sub>3</sub> troposférico, formam-se outras espécies oxidantes resultantes de reacções envolvendo NO<sub>x</sub> e COV (nomeadamente hidrocarbonetos não queimados e aldeídos), como por exemplo o nitrato de peroxiacetilo, de acordo com reacção química R. 3.11 (Albert, 1988; Chang, 1994; Finlayson-Pitts & Pitts Jr *et al.*, 1997).



O  $HNO_3$  é formado após reacção do  $NO_2$  com vapor de água (ver reacção química R. 3.12). (Albert, 1988; Chang, 1994).



### Mecanismos de redução de emissões poluentes

Os mecanismos de redução dos poluentes gerados durante a combustão num motor de combustão interna por compressão podem ser classificados em duas categorias distintas, nomeadamente alterações no processo de combustão e métodos pós-combustão.

Nas alterações do processo de combustão incluem-se os catalisadores de oxidação, a adsorção de  $NO_x$ , a recirculação dos gases de escape (RGE), a diminuição do conteúdo de enxofre do combustível, o avanço da injeção, sistemas de injeção, a pressão de injeção, componentes do êmbolo, sobrealimentação e a redução da temperatura do ar de admissão. Entre os mecanismos de pós-combustão encontram-se a redução selectiva de  $NO_x$  e os filtros de partículas (Martins, 2006). No Quadro 3-2 são indicados quais os poluentes abrangidos por cada mecanismo de redução.

**Quadro 3-2 - Mecanismo de redução utilizado em função do poluente (adaptado de Martins, 2006)**

Poluente	Mecanismo de Redução
CO, HC, PAH's	Catalisadores de oxidação; Avanço da injeção.
$NO_x$	Redução selectiva de $NO_x$ ; Adsorção de $NO_x$ ; RGE;

<b>Poluente</b>	<b>Mecanismo de Redução</b>
	Redução temperatura do ar de admissão; Sistemas de injeção.
PTS	Diminuição do conteúdo de S no combustível; Pressão de injeção; Componentes do êmbolo; Filtros de partículas; Sistemas de injeção.

Na redução catalítica selectiva a taxa de eliminação dos  $\text{NO}_x$  presentes nos gases de escape poderá ser superior a 80%, devendo para tal existirem temperaturas superiores a 720 K. Nesta técnica é utilizado amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), ureia ( $[\text{NH}_2]_2\text{CO}$ ) e ácido cianúrico ( $[\text{HOCN}]_3$ ). A adsorção de  $\text{NO}_x$  é utilizada em motores que realizam a combustão em excesso de ar, mediante a utilização de catalisadores que adsorvem os  $\text{NO}_x$  (com taxas de rendimento superiores a 80%). Esta técnica é condicionada pelo teor em enxofre do gasóleo, que diminui a sua eficácia. Para além deste benefício, a utilização de gasóleo com um baixo teor em enxofre irá contribuir para uma diminuição da emissão de PTS, uma vez que a maioria das partículas produzidas nos motores de combustão interna por compressão crescem à volta dos átomos de enxofre (Martins, 2006) (Coelho & Costa, 2007).

A RGE tem como objectivo reduzir a produção de  $\text{NO}_x$  através da redução da temperatura máxima de chama através da adição de gases de escape. Um inconveniente deste processo é o aumento das PTS. Adicionalmente a emissão de PTS pode ser reduzida através da utilização de êmbolos, geralmente constituídos por material cerâmico e alumínio, que permitam uma maior temperatura de funcionamento, diminuindo as zonas de mistura não queimada (Martins, 2006).

Sistemas de injeção recentes utilizam pré e pós-injecções de forma a reduzir os poluentes. As pré-injecções diminuem o carácter explosivo da combustão, diminuindo a emissão de  $\text{NO}_x$ . O término abrupto da injeção principal e a utilização de pós-injecções permitem o aumento da temperatura dos gases, com consequente diminuição

da emissão de PTS. Adicionalmente estes sistemas de injeção melhoram a eficácia dos catalisadores de oxidação e dos filtros de partículas. No que respeita à pressão de injeção, quanto mais intensa for esta, melhor será a atomização e penetração do “spray” o que contribuirá para uma diminuição da emissão de PTS. Quanto maior o avanço da injeção, maior será a produção de NO<sub>x</sub> e a redução de PTS, enquanto a diminuição do avanço da injeção provoca a situação inversa (Martins, 2006).

### **Gases com efeito de estufa**

Os gases com efeito de estufa (GEE) têm a propriedade de absorverem e emitirem radiação infravermelha. Quando aumenta a concentração de GEE na atmosfera há uma maior parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre que é absorvida. Estes desempenham um papel fulcral no equilíbrio radiativo da atmosfera que permite a existência de vida na Terra, uma vez que sem a existência de GEE a radiação infravermelha não seria absorvida pela atmosfera e esta não emitiria energia para a superfície terrestre. Esta situação conduziria a uma temperatura média global da atmosfera próxima dos 255 K, no lugar dos 288 K actuais. Desta forma, o efeito de estufa natural existente favorece as condições de vida no planeta, quando comparado com um cenário em que o mesmo não existisse (Santos *et al.*, 2006).

As actuais emissões antropogénicas de GEE estão, de acordo com alguns autores, a aumentar o forçamento radiativo<sup>15</sup> positivo já existente resultante dos GEE de origem biogénica, o que conduzirá a uma alteração do sistema climático (IPCC, 2007). Os efeitos das alterações climáticas, nomeadamente o aumento da temperatura média global da atmosfera junto à superfície terrestre, a alteração na distribuição espacial e temporal da precipitação, a alteração na frequência e intensidade de fenómenos climáticos extremos e o aumento do nível médio do mar, irão ter impactos significativos em vários sistemas naturais e sociais (Santos *et al.*, 2006).

No que respeita à combustão nos motores de combustão interna por compressão, os principais gases com estufa resultantes são o vapor de água e o CO<sub>2</sub> (ver reacção

---

<sup>15</sup> Medida da variação da irradiância líquida na tropopausa, após reajuste da temperatura da estratosfera, comparativamente a períodos em que o valor da temperatura da troposfera e superfície terrestre era imperturbável (metodologia IPCC: ano de 1750) (IPCC, 2007);

química R. 3.1),  $\text{N}_2\text{O}$ , aerossóis e  $\text{O}_3$  troposférico (GEE indirecto, ver reacção química R. 3.9 e R. 3.10) (IPCC, 2007).

O  $\text{CO}_2$  é o principal GEE emitido durante a combustão, resultando da combustão completa do combustível ou da oxidação do CO na troposfera (Crutzen, 1994).

O vapor de água proveniente da combustão de combustíveis fósseis é bastante inferior quando comparado com o que é proveniente de actividades de uso do solo (Boucher *et al.*, 2004). A concentração de vapor de água na troposfera é muito variável, uma vez que a acumulação deste é condicionada pela sua condensação e consequente precipitação (Coelho & Costa, 2007). De acordo com os valores de forçamento radiativo publicados, o  $\text{CO}_2$  apresenta um valor médio de  $1,66 \pm 0,17 \text{ W/m}^2$ , o  $\text{N}_2\text{O}$   $0,16 \pm 0,02 \text{ W/m}^2$ , o  $\text{O}_3$  troposférico  $0,35 \text{ W/m}^2$ , os aerossóis provenientes da combustão de combustíveis fósseis  $-0,05 \pm 0,05 \text{ W/m}^2$  e os aerossóis provenientes da combustão incompleta  $0,20 \pm 0,15 \text{ W/m}^2$  (IPCC, 2007).

Página Propositadamente Deixada em Branco



## 4 COMBUSTÍVEIS

### 4.1 Gasóleo de origem fóssil

O gasóleo de origem fóssil provém do petróleo bruto refinado. Embora varie consoante a sua proveniência, o petróleo bruto é geralmente constituído, em termos mássicos, por cerca de 84% a 87% de carbono, 11% a 14% de hidrogénio, 0% a 3% de enxofre e 0% a 0,5% de azoto e oxigénio. A gasolina, actualmente, é o principal produto da refinação do petróleo bruto, cerca de 38%, representando o gasóleo, em conjunto com os óleos lubrificantes, cerca de 18,2% (Coelho & Costa, 2007).

A refinação do petróleo bruto, para produção de gasóleo, envolve processos de destilação fraccionada, “cracking” catalítico, “cracking” térmico e hidrogenação.

Durante a destilação fraccionada as diferentes fracções do petróleo são separadas numa coluna de destilação atmosférica, de acordo com as suas volatilidades. Após a destilação atmosférica segue-se uma segunda destilação a baixa pressão para refinar a separação e uma purificação, cujo objectivo é retirar o enxofre e hidrocarbonetos. Geralmente os produtos da destilação fraccionada são, em termos mássicos, 1% de metano, 4% de gases de refinaria, 12% de gasolina leve, 18% de nafta, 17% de querosene, 7% de gasóleo pesado e 41% de resíduos (Odgers & Kreschmer, 1986; Coelho & Costa, 2007).

Numa segunda fase é retirado o alcatrão (cerca de 11%) dos resíduos produzidos durante a destilação fraccionada, geralmente através de uma segunda destilação a baixa pressão. Os resíduos sobrantes são encaminhados para um processo de “cracking” catalítico onde se obtém, em termos mássicos, cerca de 2% de gás de petróleo, 3% de butano, 10% de gasolina, 8% de gasóleo leve, 5% de gasóleo pesado e 2% de coque (Odgers & Kreschmer, 1986; Coelho & Costa, 2007).

Numa fase final o gasóleo pesado obtido durante o processo de “cracking” catalítico é combinado com o alcatrão obtido da segunda destilação a baixa pressão realizada aos resíduos obtidos após a destilação fraccionada. Esta mistura é sujeita a um processo de “cracking” térmico, resultando, em termos mássicos, cerca de 1% de gás de petróleo,

0,5% de butano, 3% de gasolina, 1,5% de gasóleo e 10% de fuel-óleo residual. O teor em hidrogénio do gasóleo obtido poderá ser aumentado através do processo de hidrogenação (Odgers & Kreschmer, 1986; Coelho & Costa, 2007).

As propriedades mais importantes do Gasóleo, no que respeita à combustão são a densidade ( $\text{kg/m}^3$ ), viscosidade dinâmica ( $\text{Pa.s}$ ) e a tensão superficial ( $\text{N/m}$ ), que afectam directamente a atomização, assim como o índice de cetano, a composição elementar, o calor latente de vaporização, o “flash point”, os limites de flamabilidade do combustível, a temperatura de auto-ignição/inflamação e o poder calorífico. O gasóleo utilizado em motores de combustão interna por compressão na União Europeia, deverá ter uma densidade, a 288 K (15 °C), compreendida entre 820,00 a 845,00  $\text{kg/m}^3$ , um índice de cetano superior a 51, uma viscosidade cinemática<sup>16</sup>, a 313 K (40 °C), entre 2,00 a 4,50  $\text{mm}^2/\text{s}$  e um “flash point” superior a 333 K (60 °C) (IPQ, 2005).

## 4.2 Biocombustíveis

A utilização de óleos enquanto combustíveis líquidos em motores de combustão interna por compressão, sem qualquer tipo de alteração, remonta ao ano de 1900, no qual foi apresentada durante a exposição de Paris. Esta experiência tinha como objectivo obter resultados que permitissem a utilização dos motores de combustão interna por compressão nas colónias Africanas dos países europeus (Bélgica, França, Itália e Reino Unido) onde abundavam óleos de palma e outros, de forma a potenciar a sua independência energética (Diesel, 1912) (Diesel, 1913) (Knothe *et al.*, 2005). Durante a segunda guerra mundial, países como a China, Brasil, Argentina e Índia utilizaram óleos vegetais como combustíveis líquidos (Knothe *et al.*, 2005).

---

<sup>16</sup> Razão entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido (Knothe *et al.*, 2005).

#### 4.2.1 Biocombustível de 1ª geração

O biodiesel<sup>17</sup>, designado neste trabalho como biocombustível de 1ª geração, é produzido a partir de óleos vegetais ou animais (misturas de triglicéridos), assim como de óleos alimentares usados. Neste âmbito, as principais culturas energéticas são o girassol (*Helianthus annuus*), a soja (*Glycine Max L.*), a colza (*Brassica napu*) e a palma (da família *Arecaceae*). Também poderão ser utilizadas outras culturas energéticas como o cardo (*Cynara cardunculus*) (Curt & Fernández, 2004) ou matérias-primas alternativas, como microalgas, nomeadamente clorófitas e diatomáceas (Rosa, 2007).

Cada triglicérido é constituído por uma mistura de várias cadeias de ácidos gordos (Knothe *et al.*, 2005). No Anexo 1 são indicadas as características dos óleos vegetais mais utilizados, em termos da composição de ácidos gordos e características destes.

Embora os óleos vegetais na forma pura possam ser utilizados directamente nos motores de combustão interna por compressão, as suas propriedades apresentam menos vantagens para esta aplicação (Thuijl *et al.*, 2003). No Quadro 5-1, encontram-se indicados alguns parâmetros relevantes dos óleos vegetais e do gasóleo de origem fóssil, considerando as culturas energéticas mais frequentes.

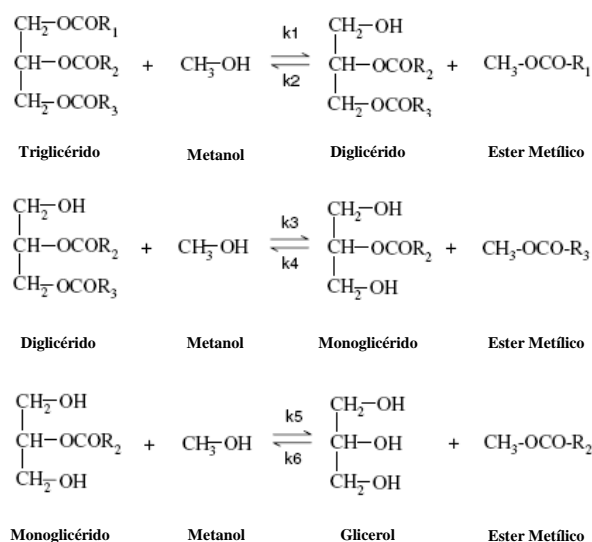
**Quadro 4-1 - Comparação de parâmetros relevantes (valores médios) em óleos vegetais e gasóleo de origem fóssil. VC, viscosidade cinemática; IC, índice de cetano; PI, ponto de inflamação; PCS, poder calorífico superior (adaptado de Knothe *et al.*, 2005)**

Gasóleo/Óleo	VC (310,95 K, mm <sup>2</sup> /s)	IC	PI (K)	PCS (MJ/Kg)
Gasóleo de origem fóssil	2,7	47,0	325,15	45,3
Colza	37,0	37,6	519,15	39,7
Girassol	37,1	37,1	547,15	39,6
Soja	28,5 - 32,6	37,9	527,15	39,6

De forma a obter um combustível que se aproxime das características do gasóleo de origem fóssil, os óleos vegetais puros extraídos das culturas energéticas, ou gorduras

<sup>17</sup> Definido na legislação portuguesa como “éster metílico produzido a partir de óleos vegetais ou animais, com qualidade de combustível para motores de combustão interna por compressão, para utilização como biocombustível” (DRa, 2006).

animais, são convertidos em biodiesel (ésteres de ácidos gordos), obtendo-se um biocombustível com um índice de cetano superior e uma menor viscosidade. A reacção utilizada para converter os óleos puros, ou gorduras animais, em biodiesel denomina-se transesterificação (Figura 4.1).



**Figura 4.1 – Reacção de Transesterificação. R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> representam cadeias de ácidos gordos. k<sub>1</sub> a k<sub>6</sub> representam as constantes de reacção. Adaptado de Cao *et al.*, 2008**

A reacção de transesterificação é realizada à pressão atmosférica normal, sendo a temperatura mínima a ambiente e a máxima a temperatura de ebulição do álcool utilizado (Knothe *et al.*, 2004).

Para que a reacção de transesterificação ocorra, são utilizadas 6 moles de álcool por cada mole de triglicérido (6:1). A principal razão prende-se com a promoção da reacção, no âmbito do princípio de Le Chatelier, considerando que a reacção de transesterificação é reversível. Os álcoois geralmente utilizados são o metanol, etanol e isopropanol. Uma característica comum a todos é o facto de serem higroscópicos, absorvendo água a partir do ar, o que pode resultar na formação de sabão, ácidos livres e triglicéridos, influenciando a reacção de transesterificação e diminuindo a qualidade do biodiesel (Knothe *et al.*, 2004). Geralmente utiliza-se o metanol, que embora mais tóxico, é mais barato, menos inflamável e mais fácil de remover do glicerol e do biodiesel, com vista à sua reutilização no processo (Knothe *et al.*, 2005).

Os catalisadores utilizados durante a reacção de transesterificação podem ser básicos (Hidróxidos de sódio ou de potássio, Metóxido de sódio e de potássio), ácidos (ácidos e resinas acídicas), enzimáticos (lipases) ou mistos (catálise ácida seguida de básica) (Knothe *et al.*, 2005; Oliveira & Rosa, 2004).

Normalmente o processo industrial de produção de biodiesel utiliza os catalisadores básicos, nomeadamente o NaOH (hidróxido de sódio) e KOH (hidróxido de potássio). As catálises ácida ou mista aplicam-se mais a óleos que apresentam teores elevados de ácidos gordos livres (> 5%) e a catálise enzimática está ainda em fase de desenvolvimento, não existindo processos industriais implementados (Knothe *et al.*, 2004).

O glicerol, designação IUPAC 1,2,3-propanotriol (Campos, 2002), é completamente solúvel em água e álcool, sendo insolúvel em hidrocarbonetos, o que torna a reversibilidade da reacção de transesterificação, relativamente aos monoglicéridos, praticamente negligenciável (Knothe *et al.*, 2005). Algumas das suas características encontram-se indicadas no Anexo 1. Por cada tonelada de biodiesel produzido resulta cerca de 100 kg de glicerol (Knothe *et al.*, 2004). O destino do glicerol produzido poderá ser um problema uma vez que o mercado afecto à indústria<sup>18</sup> que utiliza este resíduo/matéria-prima encontra-se saturado. Neste sentido procuram-se novas vias de valorização para o glicerol em sectores relacionados com a alimentação animal, como fonte de carbono para fermentações, como agente estabilizante da madeira, entre outros (Knothe *et al.*, 2004).

As principais reacções paralelas que podem afectar a qualidade do biodiesel obtido são a formação de sabão (ou saponificação) a partir da hidrólise alcalina de óleos ou gorduras com elevados índices de ácidos gordos livres e do catalisador básico que normalmente é utilizado, a formação de ácidos gordos livres e diglicéridos a partir da hidrólise dos triglicéridos, especialmente a temperaturas elevadas, e a formação de

---

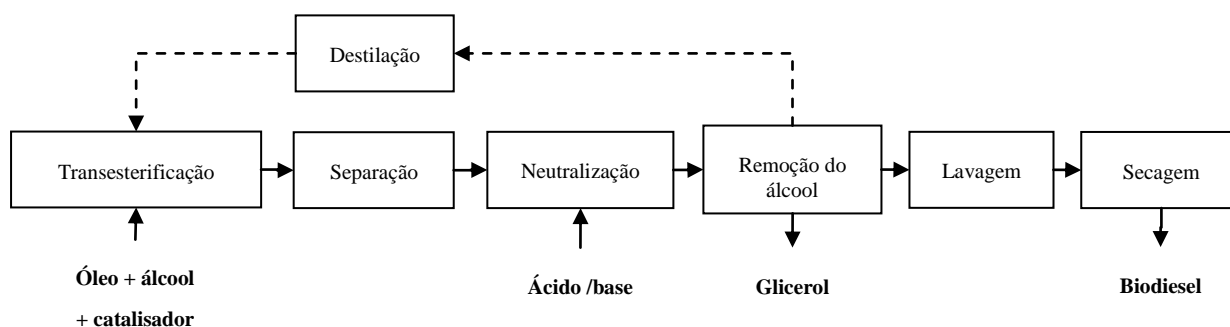
<sup>18</sup> Cosmética, produção de sabões e farmácia, resinas alquídicas, alimentação, tabacos, celofanes, detergentes, entre outros (Knothe *et al.*, 2005).

ácidos gordos livres e álcool resultante da hidrólise dos ésteres metílicos formados (Knothe *et al.*, 2004; Knothe *et al.*, 2005).

De uma forma geral, a produção industrial de biodiesel, assumindo a utilização de metanol e catálise básica, consistirá, de acordo com Knothe *et al.*, 2004, nos seguintes passos ( Figura 4.2):

1. **Reacção de transesterificação;**
2. **Separação das duas fases**, apresentam densidades diferentes, esta fase de separação é realizada pela sedimentação do glicerol e consequente depuração, ou através da centrifugação (sistemas de decantação ou centrifugação). O excesso de metanol (que actua como solvente), tende a diminuir a velocidade da separação;
3. **Neutralização**, nesta etapa o catalisador é removido do biodiesel e do glicerol. A introdução de um ácido nesta fase irá, nos ésteres e no glicerol, quebrar as moléculas resultantes da reacção de saponificação que possa ter ocorrido, formando sais solúveis em água e ácidos gordos livres;
4. **Remoção do álcool**, o metanol é removido por destilação convencional ou por vácuo;
5. **Lavagem do biodiesel**, contribui para a sua purificação, eliminando vestígios do metanol e catalisador, assim como outras impurezas. Podem ser aplicadas lavagens por borbulhamento ou por chuveiro. As águas de lavagens deverão ser reaproveitadas para o próximo volume de biodiesel a ser produzido. Por exemplo, no caso de 3 lavagens consecutivas, poderá aproveitar-se a água da 2ª lavagem para fazer a 1ª do novo volume, a 3ª água de lavagem faz a 2ª do novo volume e uma água nova será utilizada para fazer a última lavagem;
6. **Secagem do biodiesel**, tem o objectivo de reduzir o seu teor em água, podendo ser realizada por temperatura (evaporação), decantação ou centrifugação.

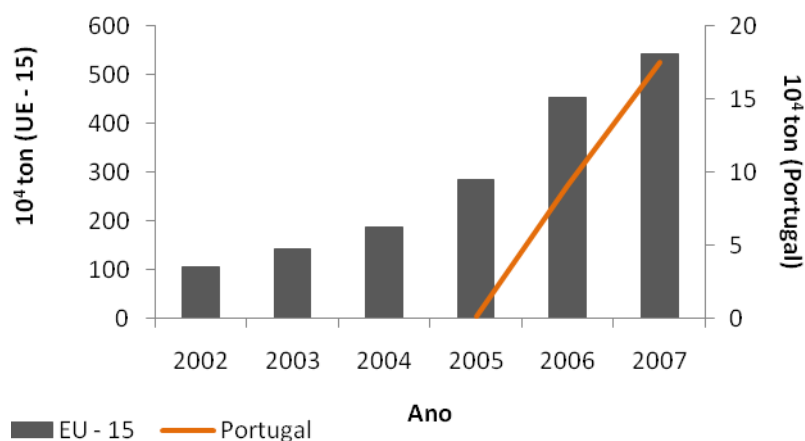
Numa última etapa o metanol é separado da água, utilizando-se para o efeito uma coluna de destilação, sendo reutilizado no processo.



**Figura 4.2 – Fluxograma geral do processo de produção industrial de biodiesel de 1ª geração (adaptado de Knothe *et al.*, 2004)**

Adicionalmente, têm sido realizadas pesquisas no sentido de melhorar o método de produção de biodiesel. Estas têm-se centrado na procura de um método mais rápido e eficiente de realizar a transesterificação, nomeadamente através da produção em contínuo, utilização de reactores mais eficientes, novos métodos de aquecimento do reactor e desenvolvimento de métodos que permitam a não utilização de catalisadores (Cao *et al.*, 2008; Kusdiana & Saka, 2004; Hernando *et al.*, 2007).

Na Figura 4.3 é apresentada a evolução registada na União Europeia, a 15 Estados-Membros, e em Portugal no que respeita à produção de biodiesel. Ao nível da UE-15 existiu um aumento, entre 2002 e 2007, de cerca de 409%, perfazendo  $5.426,0 \times 10^3$  toneladas produzidas em 2007. Nesse ano, os Estados Membros que mais contribuíram para este valor foram a Alemanha, França e Itália, com a produção de  $2.890,0 \times 10^3$  toneladas,  $872,0 \times 10^3$  toneladas e  $363,0 \times 10^3$  toneladas, respectivamente. Portugal produziu em 2007 cerca de  $175,0 \times 10^3$  toneladas de biodiesel (EEAa, 2009).



**Figura 4.3 – Evolução da produção de biodiesel na União Europeia a 15 e em Portugal (adaptado de EEAa, 2009)**

Na Europa a qualidade do biodiesel é regulada pela norma EN14214, resultante de um acordo entre produtores de motores e de biodiesel, permitindo o desenvolvimento e a validação de métodos de teste (Rosa, 2007). Os parâmetros desta norma são indicados no Anexo 2.

## Qualidade do Biodiesel

A qualidade do biodiesel produzido depende de factores relacionados com as matérias-primas utilizadas (relacionados com a composição em ácidos gordos dos óleos ou gorduras utilizados), factores de produção e de pós-produção.

- **Matérias-Primas:**

- Índice de cetano, aumenta com o aumento do tamanho da cadeia de ácidos gordos e com o aumento do grau de saturação; diminui com o aumento do grau de insaturação e aumento do grau de ramificação das moléculas de ácidos gordos (Knothe *et al.*, 2003);
- Viscosidade, aumenta com o aumento do tamanho da cadeia de ácidos gordos e com o aumento do grau de saturação (Knothe *et al.*, 2005);
- Poder calorífico superior, aumenta com o tamanho da cadeia de ácidos gordos (Knothe *et al.*, 2005);



- Resistência a baixas temperaturas, aumenta com a diminuição do tamanho da cadeia de ácidos gordos e diminuição do seu grau de saturação, o que se traduz em menores valores de “Cloud Point<sup>19</sup>” e “Pour Point” (Knothe *et al.*, 2005).
- **Factores de produção**, a existência de uma grande quantidade de glicerol livre no biodiesel tornará o combustível mais viscoso, potenciando problemas de combustão no motor (ao nível da atomização e combustão), assim como entupimento dos filtros de combustível. Adicionalmente a existência de álcool residual no biodiesel irá contribuir para a diminuição do ponto de inflamação (Knothe *et al.*, 2005).
- **Factores de pós-produção**, a qualidade do biodiesel é afectada pela água em suspensão que contribui para a corrosão do sistema de injeção do motor de combustão interna por compressão e para o crescimento de microorganismos no combustível, aumentando o índice de acidez do mesmo e o entupimento dos filtros de combustível. De forma semelhante, a existência de sedimentos no biodiesel potencia o entupimento dos filtros de gasóleo. Aquando do armazenamento do biodiesel deverá ser evitado o contacto deste com o ar e água, de forma a manter a estabilidade oxidativa e a estabilidade hidrolítica, respectivamente. A oxidação potenciará um aumento do índice de acidez e da viscosidade do biodiesel. Na presença de água, existirá hidrólise dos ésteres, o que provocará o aumento do índice de acidez pela formação de ácidos gordos livres (Knothe *et al.*, 2005).

De acordo com as normas em vigor, o gasóleo rodoviário (820 kg/m<sup>3</sup> a 845 kg/m<sup>3</sup>) apresenta uma densidade inferior ao biodiesel (860 kg/m<sup>3</sup> a 900 kg/m<sup>3</sup>) comercializado para veículos motorizados (IPQ, 2005; Knothe *et al.*, 2005; Rosa, 2007).

---

<sup>19</sup> Temperatura à qual os cristais de cera, resultantes da nucleação dos alcanos (C18 – C30), se tornam visíveis (diâmetro  $\geq 5 \mu\text{m}$ ) formando uma suspensão (Knothe *et al.*, 2005).

#### 4.2.2 Biocombustível de 2ª geração

Nos ensaios de combustão realizados foi utilizado biocombustível produzido a partir da hidrogenação de óleos vegetais e/ou animais, sendo um dos biocombustíveis actualmente considerados como sendo de 2ª geração.

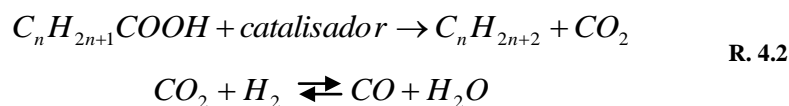
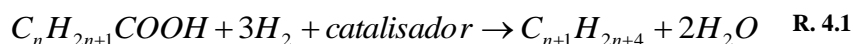
##### Hidrogenação de Óleos vegetais

O biocombustível resultante da hidrogenação de óleos vegetais, “HVO”, é considerado um biocombustível de segunda geração por apresentar métodos de produção mais eficientes, ser mais biodegradável e reduzir as emissões de poluentes quando comparado com o gasóleo e o biocombustível de primeira geração. Se comparado com o biocombustível de primeira geração apresenta a vantagem de não apresentar oxigénio na sua estrutura molecular e poder ser utilizado directamente, ou através de misturas, em motores de combustão interna por compressão sem que sejam necessárias alterações no motor (Nils-Olof *et al.*, 2008).

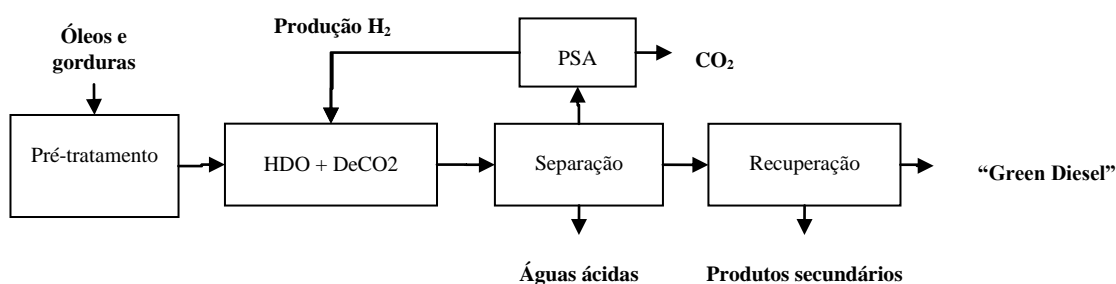
Pode ser produzido numa unidade dedicada ou numa unidade já existente de hidrogenação, sendo que neste último caso poderá ser incorporado no gasóleo de origem fóssil para produção de gasóleo com baixo teor em enxofre (UOP, 2006). A produção numa unidade dedicada apresenta como principais vantagens a possibilidade de melhorar a eficácia dos catalisadores utilizados através do pré-tratamento dos óleos e gorduras utilizadas (podem conter metais básicos, água, cinzas, entre outros), o processo pode incorporar diferentes mecanismos de remoção do O<sub>2</sub>, pode ser utilizado um processo mais simples de isomerização que permita obter um melhor “Cloud Point” e o processo pode ser dimensionado especificamente para as matérias primas utilizadas na produção do “Green Diesel” (UOP, 2006).

A produção numa unidade já existente, favorecerá (devido às altas pressões) a remoção do O<sub>2</sub> dos triglicéridos através da hidrodesoxigenação (ver reacção química R. 4.1). Numa unidade dedicada, a remoção do O<sub>2</sub> pode ser realizada mediante a hidrodesoxigenação (HDO) ou descarboxilação (DeCO<sub>2</sub>) (ver reacção química R. 4.2), esta última favorecida a baixas pressões e temperaturas, mediante selecção das condições de processamento (UOP, 2006) (Kalnes *et al.*, 2008). A descarboxilação

apresenta as vantagens de diminuir o consumo de  $H_2$  (o consumo de  $H_2$  é limitado pela saturação dos alcenos/olefinas), apresentar menor custos de investimento, não produzir água enquanto produto principal e de se poder capturar o  $CO_2$  produzido (UOP, 2006).



Na Figura 4.4 é apresentado o diagrama geral do processo de produção de “Green Diesel”, biocombustível de segunda geração já em produção. A reacção ocorre a temperaturas entre os 573 K e 623 K e a pressões de aproximadamente  $3,45 \times 10^6$  Pa. Geralmente são utilizados como catalisadores, nas reacções de HDO e DeCO<sub>2</sub>, o NiMo, CoMo e Pd (UOP, 2006). Os produtos principais são o “Green Diesel” (83% - 86%) e hidrocarbonetos leves (2% - 5%). Os sub-produtos (12% - 16%) incluem água e  $CO_2$  (UOP, 2006).



**Figura 4.4 - Fluxograma geral do processo de produção de “Green Diesel”. PSA, “Pressure swing adsorption” que realiza a purificação e reciclagem do  $H_2$ . Adaptado de Kalnes *et al*, 2007**

O Quadro 4-2 apresenta as características do “Green Diesel”, biodiesel e gásóleo de origem fóssil.

**Quadro 4-2 - Comparação de parâmetros relevantes (valores médios) em biocombustível e gásóleo. VC, viscosidade cinemática; IC, índice de cetano; PI, ponto de inflamação; PCS, poder calorífico superior; PCI, poder calorífico inferior (adaptado de (I) Knothe *et al.*, 2005; (II) Nils-Olof *et al.*, 2008)**

Combustível	VC (313,15 K, mm <sup>2</sup> /s)	IC	PI (K)	PCS (MJ/kg)
“Green Diesel” (II))	2,9 – 3,5	84 - 99	---	44,0 (PCI)
Gasóleo de origem fóssil (I)	2,7 (a 310,95 K)	47,0	325,15	45,3
Éster metílico de colza (I)	4,53 – 4,96	47,9 – 56,0	439,15 – 442,15	8,85 - 39,87
Éster etílico de colza (I)	6,02	67,4	443,15	40,66
Éster metílico de girassol (I)	4,39	58,0	383,15	38,47 (PCI)
Éster metílico de soja (I)	3,99 – 4,27	48,7 – 55,9	458,15 – 463,15	39,82 – 39,87

### 4.2.3 Emissão de poluentes

Ensaio realizados com motores de veículos pesados e biocombustível de 1ª geração indicaram que após a combustão de uma mistura volumétrica de 20% (B20, 20% biocombustível e 80% gásóleo de origem fóssil) existe, em média, um aumento de cerca de 2,0% de NO<sub>x</sub> e uma diminuição do CO, HC e PTS, de cerca de 10,0%, 11,0% e 21,1%, respectivamente, quando comparado com a combustão de gásóleo de origem fóssil (USEPA, 2002). A maioria dos autores indica uma redução da emissão de PTS, aquando da utilização de biodiesel, quando comparado com a utilização de gásóleo de origem fóssil (Graboski & McCormick, 1998; Lapuerta *et al.*, 2002). Dwivedi *et al.* (2006) utilizou uma mistura B20 num motor estático (potência de 29,8 kW a 2300 rpm) tendo obtido uma redução da emissão de PTS (mg/m<sup>3</sup>), quando comparado com o gásóleo de origem fóssil, de cerca de 18% a plena carga.

De acordo com Lebedevas *et al.* (2007), a combustão de éster metílico de óleo de colza permitiu, para a combustão de uma mistura volumétrica B30 no motor de um veículo ligeiro num banco estático a uma potência máxima de cerca de 25kW (3000 rpm; binário de 81 Nm), a redução da emissão específica (g/kWh) de CO e HC de 37% e 50%, respectivamente, quando comparada com a combustão de gásóleo de origem fóssil. A utilização de uma mistura B100 permitiu uma redução de CO e HC de cerca de 1,5 vezes superior ao B30. As emissões de NO<sub>x</sub> aumentaram até 12% com B30 e

cerca de 17% com B100, comparativamente com o gásóleo de origem fóssil, a cerca de 85% da potência máxima (Lebedevas *et al.*, 2007). Esta tendência, diminuição de CO e HC, conjuntamente com o incremento de NO<sub>x</sub>, é coerente com os resultados apresentados por Ozkan (2007) e Murilo *et al.* (2007).

Koçak *et al.* (2007) realizou ensaios de combustão com ésteres metílicos puros de óleos alimentares usados, de óleo de avelã e de óleo de colza num motor estático (potência de 82 kW a 3850 rpm), tendo obtido uma redução da emissão de NO<sub>x</sub> (ppm), de cerca de 3 a 5% para uma velocidade de 3000 rpm e uma redução da emissão de CO (ppm) de cerca de 24% a uma velocidade de 1750 rpm, quando comparado com o gásóleo de origem fóssil.

A utilização de biocombustível de 1ª geração, em motores de combustão interna por compressão originou maior consumo específico de combustível (Lebedevas *et al.*, 2007; Ozkan, 2007).

A utilização de biocombustível de 2ª geração, B20, resultante do processo de hidrogenação, num motor de autocarro equipado com recirculação de gases de escape (MAN EURO IV), utilizando um dinamómetro de chassi de acordo com o ciclo “ESC – European Steady State Cycle”, permitiu reduzir as emissões de HC em cerca de 40% e as de CO em cerca de 15%, quando comparado com a utilização de gásóleo de origem fóssil. As emissões de NO<sub>x</sub> e PTS não apresentaram diferenças face ao gásóleo de origem fóssil (Mikkonen, 2007). Utilizando um veículo ligeiro (cilindrada 1,9 dm<sup>3</sup> com catalisador de oxidação) com B20 num ciclo EUDC – “European Extra-Urban Dryve Cycle” registou-se uma diminuição, quando comparado com o gásóleo de origem fóssil, das emissões de CO, HC, NO<sub>x</sub> e PTS em cerca de 25%, 20%, 4% e 5%. (Mikkonen, 2007). Rantanen *et al.* (2005) utilizou um motor ligeiro num dinamómetro de chassi com uma mistura B85 de biocombustível resultante do processo de hidrogenação, permitindo, em média, a redução em cerca de 30% de CO, 40% HC, 5% NO<sub>x</sub> e 17% PTS, quando comparado com a utilização de gásóleo de origem fóssil.

Página Propositadamente Deixada em Branco

## 5 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E MÉTODOS

### 5.1 Instalação experimental

#### 5.1.1 Motor

Foi utilizado um motor Mercedes OM615.940. As suas principais características são apresentadas no Quadro 5-1.

**Quadro 5-1 – Principais características do motor Mercedes OM615.940**

<b>Cilindrada</b>	1,988 dm <sup>3</sup>
<b>N.º cilindros</b>	4
<b>Bomba injectora</b>	Mecânica em linha
<b>Taxa de compressão</b>	21,5
<b>Potência máxima</b>	43 kW (a 4400 rpm)
<b>Binário</b>	108 Nm (a 2400 rpm)
<b>Diâmetro do êmbolo</b>	90,9 mm
<b>Curso do êmbolo</b>	92,4 mm

O motor utilizado não sofreu qualquer tipo de alteração, nem foram introduzidos métodos de redução pós-combustão de emissão de poluentes.

#### Banco de ensaio

No presente trabalho foi utilizado um banco de ensaio Zollner, modelo A-130-DAM, 4,1 kW. Este é constituído por um dinamómetro eléctrico Zollner A-130 (correntes de Foucault<sup>20</sup>) refrigerado a água, motor de arranque de corrente trifásica de 4,1 kW e uma balança bi-pendular de escala circular Zollner. As características deste equipamento são indicadas no Quadro 5-2.

---

<sup>20</sup> O seu funcionamento baseia-se na indução electromagnética produzida pelo rotor em movimento (excitado electricamente), que irá produzir correntes de Foucault dissipadas na forma de perdas resistivas no estator; a variação da corrente de excitação conduz a variações de carga do freio (Martins, 2006).

**Quadro 5-2 - Características do banco de ensaio Zollner, modelo A-130, 4,1 kW**

<b>Dinamómetro (corrente de Foucault)</b>	<b>Motor de arranque</b>	<b>Balança</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Motor eléctrico 200 V, 50 Hz e 10 A;</li><li>• Funcionamento nos 2 sentidos de rotação;</li><li>• Velocidade máxima de 10 000 rpm;</li><li>• Binário máximo de 7,612 kgm (74,597 Nm);</li><li>• Potência máxima de 33,56 kW;</li><li>• Embraiagem de disco único de electro-íman (<math>B_{\max} = 4,0 \text{ kgm}</math>; 39,2 Nm);</li><li>• Filtro da água refrigerante (<math>\text{caudal}_{\max} = 1 \text{ m}^3/\text{h}</math>) com válvula de passagem electromagnética.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Corrente trifásica;</li><li>• Potência de 4,1 kW;</li><li>• Funcionamento nos 2 sentidos de rotação;</li><li>• Velocidade de 1440 rpm.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bi-pendular;</li><li>• Cabeça giratória 360°, 2 sentidos de rotação e 0,5 m de diâmetro;</li><li>• Escala em kg (0 -10) e kgm (0 – 8, leitura: 0,1 kgm);</li><li>• Tacómetro eléctrico (0 – 10000 rpm; leitura: 200 rpm).</li></ul>

De acordo com Martins (2006), os dinamómetros eléctricos de correntes de Foucault apresentam a vantagem de serem robustos e apresentarem uma resposta rápida a variações de carga, produzindo binário a baixas rotações. Apresentam a desvantagem de serem sensíveis a uma deficiente refrigeração e a sobrecargas.

## **Consumo de combustível**

De forma a registar o consumo volumétrico de combustível foi utilizado um sistema “bypass”, permitindo alternar a alimentação do motor entre um recipiente graduado ( $0,0476 \text{ dm}^3$ ) e dois depósitos de combustível. O tempo de consumo do volume presente no recipiente graduado foi contado utilizando um cronómetro com indicação dos centésimos de segundo.

### **5.1.2 Combustíveis**

Para a realização do presente trabalho foram realizadas misturas volumétricas de 15% e 30%, respeitantes à incorporação de biocombustível de primeira (B15.1 e B30.1) e segunda geração (B15.2 e B30.2) em gasóleo de origem fóssil. No Quadro 5-3 e



Quadro 5-4 são indicadas as principais propriedades e composição elementar dos combustíveis utilizados. Os parâmetros do gasóleo e biocombustível de segunda geração (não existindo à data de elaboração do presente trabalho uma norma específica para este biocombustível; de acordo com as referências bibliográficas apresenta características muito semelhantes ao gasóleo, tal como a inexistência de oxigénio) foram determinados através dos referenciais enunciados na EN590, os correspondentes à primeira geração foram determinados de acordo com os referenciais enunciados na EN14214. As determinações laboratoriais foram realizadas na Unidade de Emissões Zero do Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Os parâmetros das misturas volumétricas (B15.1, B30.1, B15.2 e B30.2) foram calculados através de uma relação linear.

**Quadro 5-3 – Principais propriedades dos combustíveis e respectivas misturas volumétricas utilizadas**

	Massa volúmica a 15 °C, kg/m <sup>3</sup>	VC (mm <sup>2</sup> /s)	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)	Índice de Cetano
<b>Gasóleo</b>	840,30	2,77	45.597,00	42.690,00	54,00
<b>Biocombustível 1<sup>a</sup> Geração</b>	883,10	4,28	39.841,00	37.252,00	52,40
<b>B15.1</b>	846,72	2,99	44.733,60	41.874,30	53,76
<b>B30.1</b>	853,14	3,22	43.870,20	41.058,60	53,52
<b>Biocombustível 2<sup>a</sup> Geração</b>	777,20	2,71	47.032,00	43.809,00	73,50
<b>B15.2</b>	830,84	2,76	45.812,25	42.857,85	56,93
<b>B30.2</b>	821,37	2,75	46.027,50	43.025,70	59,85

**Quadro 5-4 – Composição elementar dos combustíveis e respectivas misturas volumétricas utilizadas**

	<b>Carbono total, % (m/m)</b>	<b>Hidrogénio total, % (m/m)</b>	<b>Oxigénio total, % (m/m)</b>	<b>Azoto total, % (m/m)</b>
<b>Gasóleo</b>	86,30	13,70	0,00	< 0,02
<b>Biocombustível 1ª Geração</b>	78,30	12,20	9,50	< 0,02
<b>B15.1</b>	85,10	13,48	1,43	< 0,02
<b>B30.1</b>	83,90	13,25	2,85	< 0,02
<b>Biocombustível 2ª Geração</b>	84,70	15,30	0,00	< 0,02
<b>B15.2</b>	86,06	13,94	0,00	< 0,02
<b>B30.2</b>	85,82	14,18	0,00	< 0,02

As misturas volumétricas foram realizadas com base na densidade dos combustíveis, tendo sido determinada a massa correspondente ao volume a utilizar. Na realização das misturas foi utilizada uma balança KERN FKB15K0.5A (máximo: 15 kg; leitura: 0,5 g; reprodutibilidade: 0,5 g; linearidade:  $\pm 1,5$  g).

### 5.1.3 Amostragem de gases e partículas

#### CO, O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>

Para a amostragem de CO, O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> foi utilizado o analisador de gases TESTO 350, adiante designado como TESTO 350, em conjunto com a unidade de preparação de gases TESTO 339, adiante designado como TESTO 339 (linha aquecida).

O funcionamento do TESTO 350 baseia-se na utilização de células/sensores electroquímicos que se regem pelo princípio da potenciometria de eléctrodo indicador selectivo. Cada sensor contém uma matriz eletrolítica desenhada especificamente para a detecção de um gás em particular. Dois ou três eléctrodos (específicos de um gás) são colocados na matriz electrolítica sendo aplicada na mesma um campo eléctrico. O volume do meio gasoso amostrado ao afluir no sensor sofre oxidação ou redução no eléctrodo (ânodo ou cátodo, respectivamente) libertando iões, o que provocará o

aumento ou diminuição do potencial do eléctrodo relativamente ao eléctrodo contrário. A força electromotriz gerada é proporcional à concentração do gás presente na amostra (TESTO, 2009). No Quadro 5-5 são apresentados os intervalos de detecção (ppm base seca) e a precisão associada para cada parâmetro.

**Quadro 5-5 - Características de detecção do equipamento TESTO 350 (TESTO 350 – manual)**

Parâmetro	Intervalo de detecção	Precisão
O <sub>2</sub>	0 – 21 %	± 0,2%
CO	0 – 10.000 ppm	± 20 ppm (≤ 400 ppm)
		± 5% v.m. <sup>21</sup> (> 400 ppm; ≤ 2.000 ppm)
		± 10% v.m. (> 2.000 ppm; ≤ 10.000 ppm)
NO	0 – 3.000 ppm	± 5 ppm (≤ 100 ppm)
		± 5% v.m. (> 100 ppm; ≤ 2.000 ppm)
		± 10% v.m. (> 2.000 ppm; ≤ 3.000 ppm)
NO <sub>2</sub>	0 – 500 ppm	± 10 ppm (≤ 200 ppm)
		± 5% v.m. (> 200 ppm)
SO <sub>2</sub>	0 – 5.000 ppm	± 20 ppm (≤ 400 ppm)
		± 5% v.m. (> 400 ppm; ≤ 3.000 ppm)
		± 10% v.m. (≥ 3.000 ppm; ≤ 5.000 ppm)

No Quadro 5-6 são apresentadas as características do TESTO 339.

**Quadro 5-6 - Características do equipamento TESTO 339 (TESTO 339 – manual)**

Características	
Princípio de funcionamento	“Peltier cooler”
Caudal volumétrico	Máx: 1,0 dm <sup>3</sup> /min
Exposição material particulado	Máx: 0,02 kg/m <sup>3</sup> no efluente gasoso
Temperatura de funcionamento (K)	278,15 – 313,15
Temperatura da linha aquecida (K)	423,15

<sup>21</sup> Valor medido;

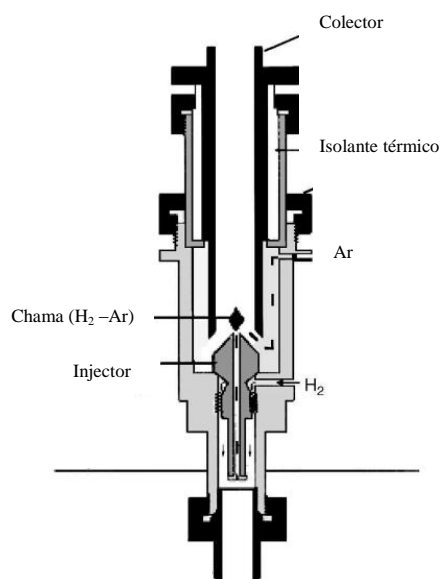
O TESTO 339 permite reduzir a absorção de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> pelo condensado. O gás amostrado, após passar pela linha aquecida a 423 K, é arrefecido até um ponto de orvalho de 276 K a 279 K através de um elemento “Peltier”, com recolha do condensado, sendo posteriormente reencaminhado para o TESTO 350 (TESTO 339 – manual).

### **Hidrocarbonetos (HC)**

Para a recolha de amostras de HC foi utilizado o analisador portátil 3030PM da Signal Group (“Flame Ionization Detector “- FID), adiante designado como 3030PM, em conjunto com uma linha aquecida.

Os equipamentos FID utilizam uma chama para promover a combustão dos compostos orgânicos. Estes compostos sofrem uma série de reacções, tais como fragmentação térmica, ionização química, reacções iónicas e radicais livres. O FID é sensível à massa (número de átomos de carbono por unidade de tempo) e não à concentração dos átomos presentes, pelo que alterações no fluxo têm efeitos negligenciáveis no seu funcionamento (Zhang, 2007).

O efluente gasoso amostrado é misturado com o combustível utilizado (geralmente H<sub>2</sub> e He, ou apenas H<sub>2</sub>) e ar, sofrendo ignição. O eléctrodo (cátodo) localizado acima da chama contabiliza os iões formados durante a combustão, sendo gerado um sinal proporcional à quantidade de átomos de carbono presente na amostra (Figura 5.1) (Zhang, 2007).



**Figura 5.1 - Detector de ionização de chama (FID) (adaptado de Zhang, 2007)**

No caso do 3030PM, o sinal gerado é amplificado e digitalizado para melhor precisão. O sistema de amostragem do equipamento funciona a elevadas temperaturas (linha aquecida e colector da amostra) o que permite a minimização da degradação ou perda de amostra (Signal Group, 2003). No Quadro 5-7 são apresentadas as principais características do 3030PM.

**Quadro 5-7 - Características do 3030PM (Signal Group, 2003)**

<b>Características</b>	
Parâmetros	HC
Intervalo de detecção (automático ou manual)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0–4 ppm; 0–10 ppm; 0–40 ppm;</li> <li>• 0–100 ppm; 0–400 ppm; 0–1.000 ppm;</li> <li>• 0–4.000 ppm; 0–10.000 ppm</li> </ul>
Fluxo de análise de amostra	$\pm 5 \text{ dm}^3/\text{min}$ (sistema “bypass”)
Linearidade	$> 0,5\%$ da escala total
Combustível	100% $\text{H}_2$
	(Pressão= 170 kPa – 240 kPa; Fluxo= $0,06 \text{ dm}^3/\text{min}$ )
Ar ambiente	$0,6 \text{ dm}^3/\text{min}$
(concentração $\text{CH}_4$ equivalente $< 500 \text{ ppm}$ )	
Temperatura do forno (K)	$(403,15 - 483,15) \pm 277,15$
Temperatura da linha aquecida (K)	$273,15 - 473,15$

Tempo de aquecimento	30 minutos
Filtro interno	0,4 $\mu\text{m}$
Gás de calibração	[Gás] = 500 ppm $\text{C}_3\text{H}_8$ em ar (Pressão= 170 kPa – 240 kPa; fluxo = 1,5 $\text{dm}^3/\text{min}$ )

A existência de um filtro interno (fibra de vidro) previne a entrada de partículas no sistema de amostragem. Os resultados são apresentados em ppm (partes por milhão) base húmida.

### Partículas Totais em Suspensão

Para a amostragem de PTS foi utilizado um conjunto de amostragem estanque, constituído por 3 módulos ( Figura 5.2), nomeadamente:

- Módulo de recolha: constituído pelo tubo de Pitot S, “nozzle”/ sonda de 0,25 polegadas (0,635 cm), porta-filtros e termopar tipo K ligado a um “datalogger” TESTO 175-T3 (medição e registo da temperatura da conduta);
- Módulo de condensação: quatro borbulhadores “Greenburg-Smith” (dois primeiros com água destilada, o terceiro vazio e o quarto com sílica) mergulhados num banho frio (água e gelo), vidros de ligação, silicone (para vedar as ligações) e molas de ligação;
- Módulo de controlo: bomba de vácuo, medidor de gás seco, manómetro de orifício (medição do diferencial de pressão no orifício), termopares (medição da temperatura à entrada e saída do manómetro de orifício), manómetro de Pitot (medição do diferencial de pressão no tubo de Pitot S).

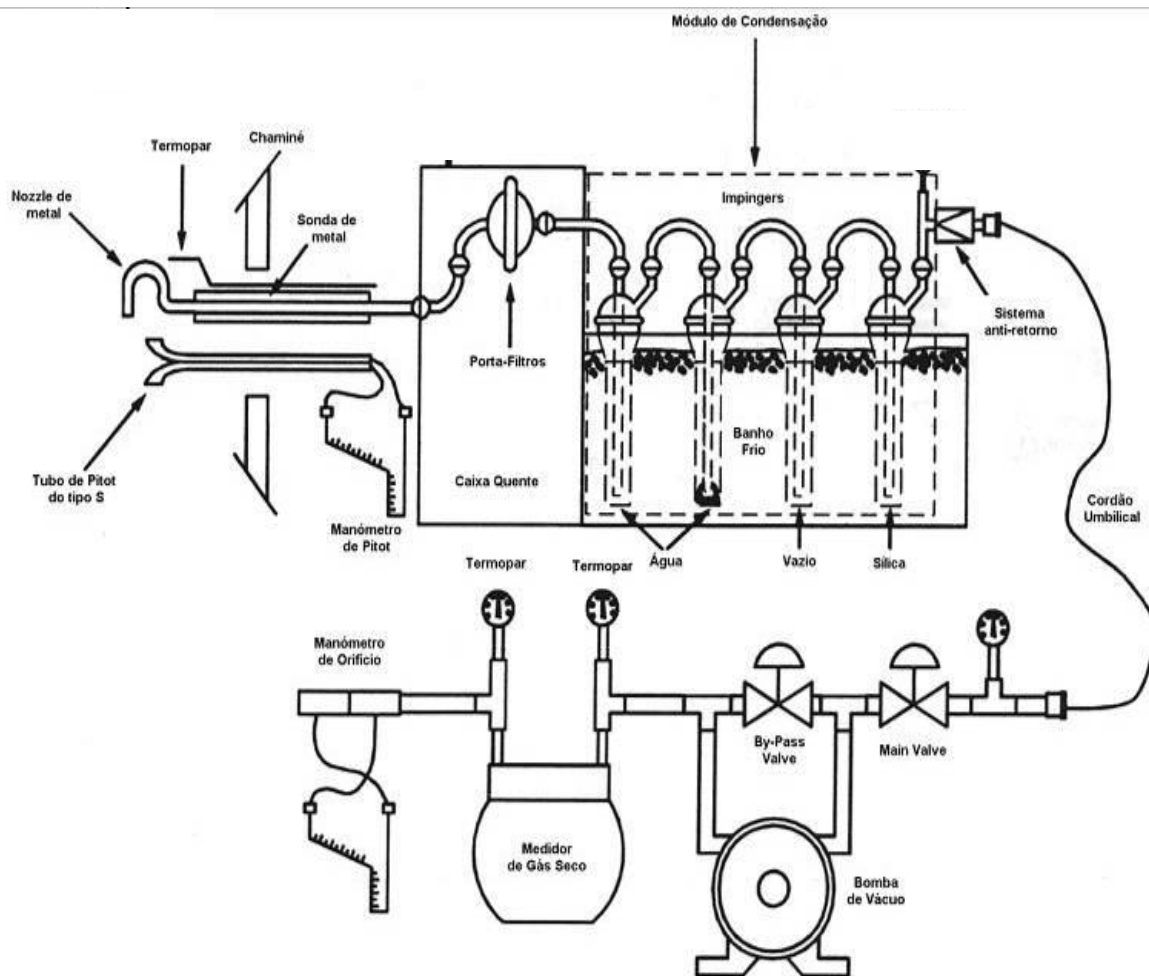


Figura 5.2 – Esquema do conjunto utilizado na amostragem de PTS (adaptado de USEPA – “Method 5”)

Foi utilizada a régua de Andersen para cálculo do diâmetro do “nozzle” a utilizar e para o valor do diferencial de pressão no orifício a existir durante a amostragem. Foram utilizados filtros Whatman tipo dedal em fibra de vidro (19x90 mm). Na pesagem dos borbulhadores foi utilizada uma balança KERN 440-47N (máximo: 2 kg; leitura: 0,1 g; reprodutibilidade: 0,1 g; linearidade:  $\pm 2$  g). Para a pesagem dos filtros foi utilizada uma balança Mettler-Toledo AT400 (máximo: 0,405 kg; leitura: 0,001 g; reprodutibilidade (0 a 50 g): 0,00005 g; linearidade:  $\pm 0,005$  g).

#### 5.1.4 Temperatura, pressão e humidade relativa

Foram utilizados termopares tipo K em conjunto com “Datalogger’s” TESTO 175-T3 para a medição da temperatura ambiente (entrada de ar na admissão do motor), efluente gasoso (gases de escape) e cabeça do motor.

A pressão atmosférica e a temperatura ambiente do laboratório a que foram realizados os ensaios foi medida com recurso ao barómetro e termómetro do laboratório, respectivamente. A humidade relativa (%) foi medida com o equipamento TESTO 451.



### 5.1.5 Diagrama geral do sistema de amostragem

Na Figura 5.3 é apresentado o diagrama geral do sistema de amostragem.

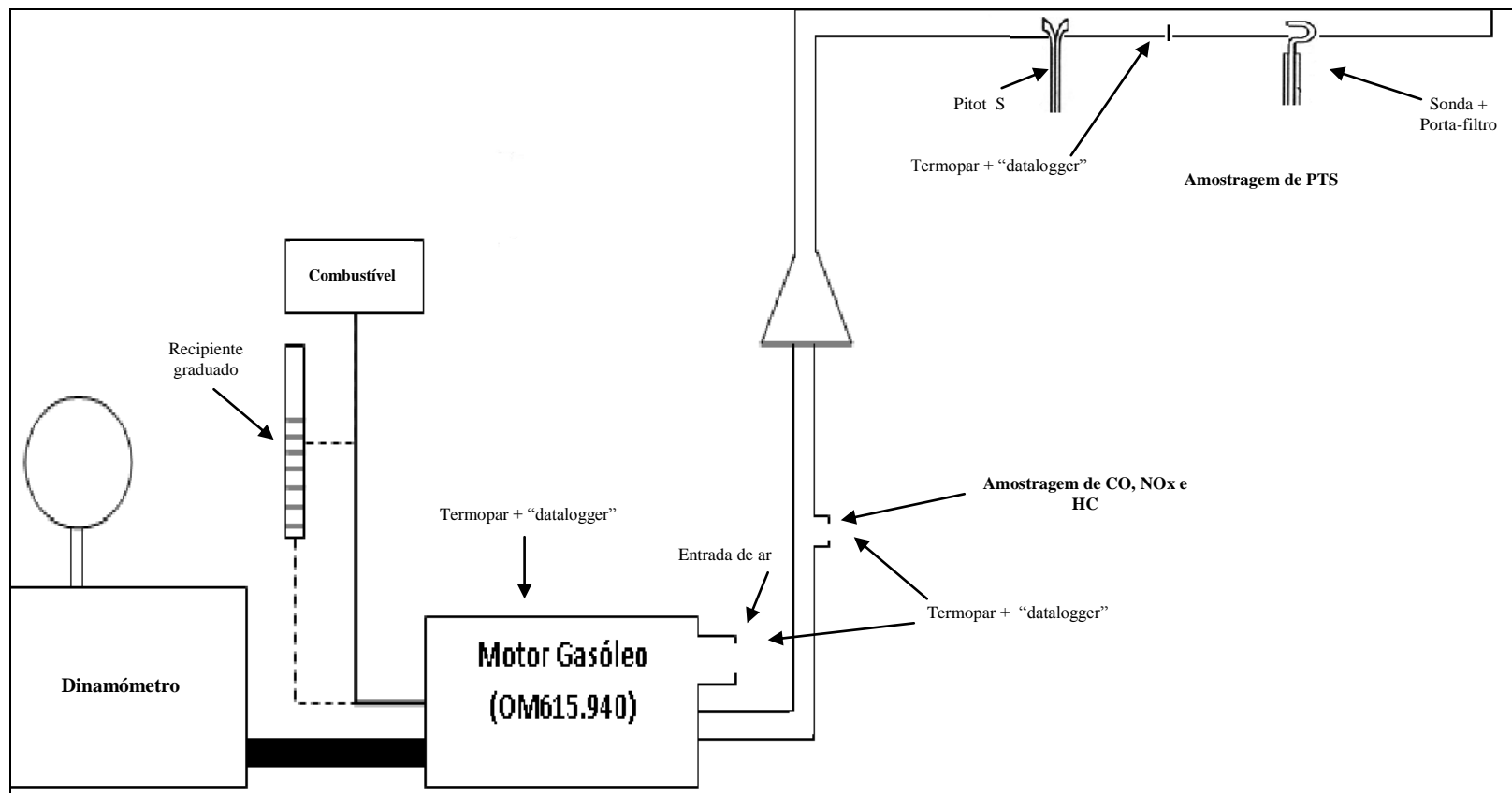


Figura 5.3 – Esquema geral do sistema de amostragem utilizado

## 5.2 Metodologia

No âmbito do presente trabalho, foram realizados ensaios de combustão num motor de combustão interna por compressão, utilizando gasóleo de origem fóssil e com incorporação de biocombustíveis, de 1ª e 2ª geração, de acordo com a seguinte metodologia:

- a) Arranque do motor com gasóleo e estabilização das temperaturas da cabeça do motor;
- b) Adoptar uma velocidade constante de 1000 rpm e 0 % da carga máxima do binário (0 kgm);
- c) Realização de ensaios para um determinado combustível:
  - a. Início da medição de parâmetros após estabilização da temperatura da cabeça do motor e temperatura dos gases de escape (B0, B15, B30):
    - i. consumo do motor;
    - ii. pressão atmosférica;
    - iii. humidade relativa e temperatura ambiente na entrada de ar no motor;
    - iv. temperatura cabeça do motor, temperatura dos gases de escape (no ponto de amostragem de gases e HC e no ponto de amostragem de PTS);
    - v. gases - O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e HC (recolha de dados, durante 10 minutos);
    - vi. partículas totais em suspensão – PTS (B0 e B15 – 25 minutos de recolha de amostras).
- d) Adoptar uma velocidade constante de 3000 rpm com aplicação de 25% da carga máxima de binário (1,5 kgm – 14,7 Nm) e repetir procedimento a partir de c.);

- e) Aplicar aumento até atingir 100% da carga máxima do binário (6 kgm – 58,8 Nm) e repetir procedimento a partir de c.);
- f) Passar para mistura seguinte (repetir procedimento de a) a e));
- g) Corrigir os valores medidos no dinamómetro (binário) utilizando o factor de correcção.

A metodologia acima descrita foi aplicada a cada combustível, nomeadamente gasóleo de origem fóssil e misturas volumétricas, resultantes da incorporação de biocombustível de primeira geração (transesterificação de óleos vegetais) e biocombustível de segunda geração (proveniente da hidrogenação de óleos vegetais) no gasóleo de origem fóssil. No Quadro 5-8 é apresentada a sequência de amostragem adoptada para cada combustível.

**Quadro 5-8 - Metodologia geral utilizada. A amostragem de PTS (partículas) foi realizada durante 25 minutos, a amostragem de G (gases) foi realizada durante 10 minutos. A sequência indicada foi realizada para os diferentes combustíveis**

Combustível	Carga Binário		
	1000 rpm	3000 rpm	
	0 % (0 Nm)	25 % (14,7 Nm)	100% (58,8 Nm)
<b>B0</b>	G + PTS	G + PTS	G + PTS
<b>B15</b>	G + PTS	G + PTS	G + PTS
<b>B30</b>	G	G	G

Foram realizadas amostragens de PTS no B0, B15.1 e B15.2, uma vez que é espectável que seja este o limite actual (incorporação de 15% de biocombustíveis no gasóleo) a utilizar em Portugal, sendo esta a percentagem máxima de incorporação que pode beneficiar do regime de isenção do imposto sobre produtos petrolíferos e energéticos (ISP), de acordo com a alínea 2 do Artigo 10º do Decreto-Lei n.º 89/2008, de 30 de Maio. De acordo com o mesmo diploma, o teor máximo de incorporação de biocombustível no gasóleo rodoviário será de 5%, podendo este valor aumentar até um

máximo de 10% no caso do gasóleo colorido e marcado (destinado a máquinas móveis não rodoviárias e tractores agrícolas e florestais).

Na apresentação dos resultados será usada a nomenclatura indicada no Quadro 5-9.

**Quadro 5-9 – Nomenclatura utilizada na apresentação dos resultados**

Mistura		Biocombustível		Condições de ensaio	
<b>B0</b>	100% gasóleo	<b>1</b>	Biodiesel 1ª geração	<b>I</b>	1000 rpm e 0 kgm (0 Nm)
<b>B15</b>	85% gasóleo + 15% biocombustível	<b>2</b>	Biocombustível 2ª geração	<b>II</b>	3000 rpm, 1,5 kgm (14,7 Nm)
<b>B30</b>	70% gasóleo + 30% biocombustível			<b>III</b>	3000 rpm, 6 kgm (58,8 Nm)

### 5.2.1 Motor

A potência útil, o consumo específico do motor e a pressão média efectiva foram calculados utilizando a Eq. 3.9, a Eq. 3.10 e a Eq. 3.11, respectivamente.

### Correcção dos valores do dinamómetro

O método adoptado para corrigir os valores obtidos a partir do dinamómetro (Binário e potência) foi o constante na ISO 1585 (1992). Nesse sentido foi calculado o factor de correcção,  $\alpha$ , a partir do factor atmosférico,  $f_a$ , e do factor do motor,  $f_m$  (ISO, 1992).

$$\alpha = f_a^{f_m}$$

$$f_a = \left( \frac{99}{P_{as}} \right) \times \left( \frac{T}{298} \right)^{0,7} \quad f_m = 0,036 \times \left( \frac{q}{r} \right) - 1,14 \quad \text{Eq. 5.1}$$

$$q = \frac{Z \times C_c}{\text{cilindrada} \times \text{rpm}}$$

T, temperatura do ar ambiente na entrada do ar do motor, em K;  $P_{as}$ , pressão ar seco em kPa; q em mg/(l.ciclo); r= 1; Z= 120.000;  $C_c$ , consumo combustível (mg/min); cilindrada em litros ( $\text{dm}^3$ );

O  $f_m$  é válido para valores da razão de q/r compreendidos entre 37,2 mg/(l.ciclo) e os 65 mg/(l.ciclo), inclusivé. Para valores de q/r inferiores a 37,2 mg/(l.ciclo) deverá adoptado um valor de  $f_m$  igual a 0,2. Para valores superiores a 65 mg/(l.ciclo) deverá ser adoptado um valor de  $f_m$  igual a 1,2 (ISO, 1992).

De forma a utilizar este método é necessário manter a temperatura ambiente entre os 283 K e os 313 K, a pressão de ar seco entre os 80 kPa e os 110 kPa (ISO, 1992) e o  $\alpha$  deverá estar compreendido entre os 0,9 e os 1,1, inclusivé (ISO, 1992).

De forma a estimar a pressão de ar seco ( $P_{as}$ ), foi estimada a pressão de vapor de água ( $P_{H_2O}$ ) com uma incerteza de cerca de 273,55 K (0,4 °C), de acordo com a fórmula de Magnus-Tetens (ver Eq. 5.2) (Barenbrug, 1974). A fórmula referida é válida para condições em que o valor de humidade relativa varia entre 1% e 100%, a temperatura ambiente (T) entre 273 K e 333 K (0 °C e 60 °C) e os valores de temperatura de ponto de orvalho ( $T_d$ ) entre 273 K e 323 K (0 °C e 50 °C) (Barenbrug, 1974).

$$\begin{aligned}
 P_{atm} &= P_{as} + P_{H_2O} & P_{H_2O} &= 0,615 \times e^{\left(\frac{a \times T_d}{b + T_d}\right)} \\
 T_d &= \frac{b \times \alpha(T, HR)}{a - \alpha(T, HR)} & \alpha(T, HR) &= \frac{a \times T}{b + T} + \ln\left(\frac{HR}{100}\right)
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 5.2}$$

a= 17,27; b= 237,7 (°C);  $P_{atm}$ , pressão atmosférica em kPa; T e  $T_d$  em °C

## Consumo de combustível

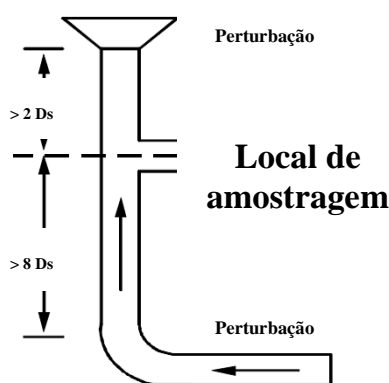
Para registar o tempo de consumo, a alimentação de combustível passou a ser realizada a partir do recipiente graduado (0,0476 dm<sup>3</sup>). A indicação do início e término do consumo de combustível presente no recipiente graduado foi dada através de um sinal sonoro resultante da existência de dois sensores fotoelétricos na sua extremidade. O cronómetro iniciava-se automaticamente quando a célula fotoelétrica superior era activada (volume = 0,0476 dm<sup>3</sup>) e terminava quando a célula inferior era activada (volume = 0,0000 dm<sup>3</sup>), sendo registado o tempo decorrido.

No Anexo 7 são apresentados os dados resultantes da amostragem do tempo de consumo do gasóleo de origem fóssil e de cada uma das misturas volumétricas de biocombustível estudadas.

### 5.2.2 Amostragem de gases e partículas

A utilização de linhas aquecidas tem por objectivo diminuir a condensação do vapor de água e os erros associados à absorção de gases na água.

O ponto de recolha de amostras de gases ( $O_2$ , CO e  $NO_x$  e HC), no tubo de escape (diâmetro= 0,053 metros), foi realizado a 0,43 metros da saída do efluente gasoso e a 0,11 metros de qualquer fonte de perturbação do fluxo do efluente gasoso a jusante (Figura 5.4).



**Figura 5.4 – Representação do local de amostragem de gases e HC. Figura adaptada de US EPA, método 1. Ds, diâmetro do tubo de escape do motor de ensaio**

Os valores obtidos em ppm foram convertidos para  $mg/(N^{22})m^3$  de acordo com a Eq. 5.3 (na conversão dos  $NO_x$  foi considerada a massa molar do  $NO_2$ ). As concentrações dos poluentes estudados, incluindo a concentração de PTS, foram corrigidas para um teor de oxigénio de referência de 8%, de acordo com a Eq. 5.4.

$$Conc_{mg/(n)m^3} = \left( \frac{Conc_{ppm} \times M_m}{V_{mol}} \right) \quad \text{Eq. 5.3}$$

$Conc_{mg/Nm^3}$ , concentração,  $mg/Nm^3$ ;  $Conc_{ppm}$ , concentração em partes por milhão;  $M_m$ , massa molar,  $g/mol$ ;  $V_{mol}$ , volume molar em CNPT ( $22,4 \text{ dm}^3/mol$ ).

$$Conc_{ref} = Conc_{med} \times \left( \frac{21 - O_{2ref}}{21 - O_{2med}} \right) \quad \text{Eq. 5.4}$$

$C_{conc_{ref}}$ , concentração do poluente para o teor  $O_2$  de referência ( $mg/Nm^3$ );  $C_{conc_{med}}$ , concentração ( $mg/Nm^3$ );  $O_{2ref}$ , teor de  $O_2$  de referência (%);  $O_{2med}$ , teor de  $O_2$  médio para o qual se determinou  $C_{med}$  (%).

<sup>22</sup> Em condições normais de pressão e temperatura, CNPT (273,15 K e 100 000 Pa);

A emissão específica de cada poluente ( $E_s$ ) foi calculada utilizando a Eq. 5.5.

$$E_s = \left[ \frac{\left( \frac{C_{poluente} \times C_{GS}}{1000} \right)}{P_e} \right] \quad \text{Eq. 5.5}$$

$E_s$ , emissão específica (g/kWh);  $C_{poluente}$ , concentração de poluente (mg/Nm<sup>3</sup>, base seca 8% O<sub>2</sub>);  $C_{GS}$ , caudal de gás seco existente durante a amostragem de gases (calculado no balanço de massa) (Nm<sup>3</sup>/h);  $P_e$ , potência efectiva (kW)

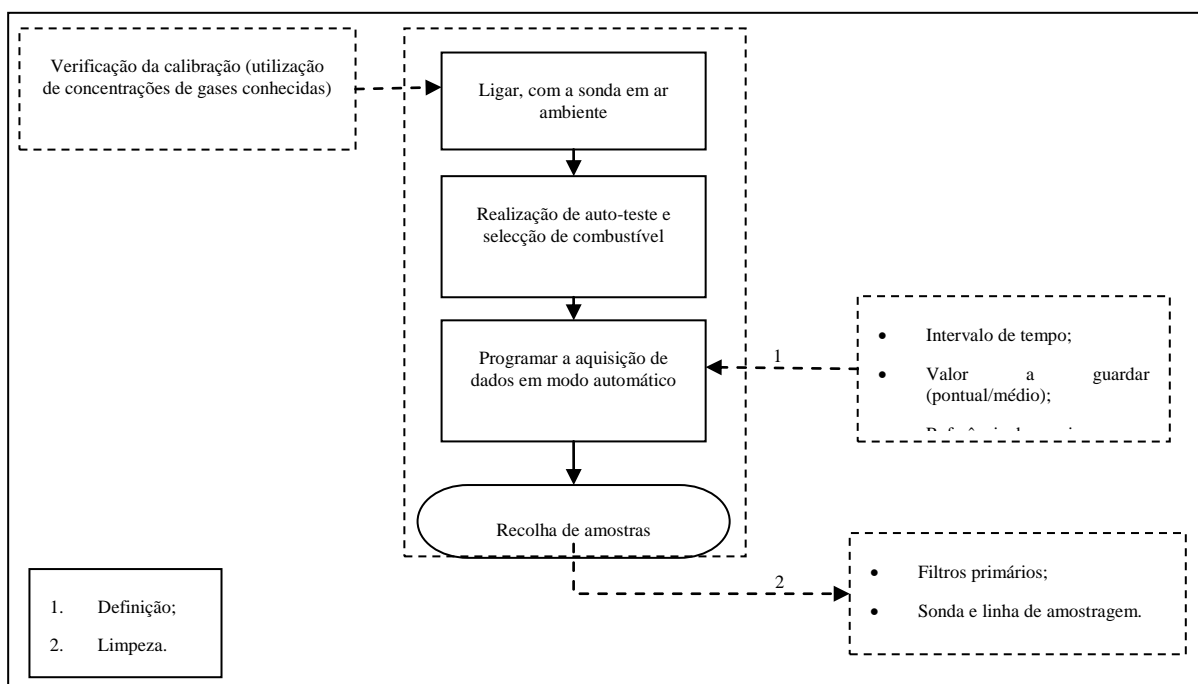
No âmbito do presente trabalho a amostragem de HC e PTS baseou-se em métodos US EPA (“United States Environmental Protection Agency”). À data de realização do mesmo, os equipamentos utilizados no Laboratório Nacional de Energia e Geologia – LNEG para a amostragem dos referidos poluentes eram direccionados para o cumprimento técnico e metodológico dos métodos US EPA.

### **CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>**

A metodologia de recolha de amostras de gases (O<sub>2</sub>, CO e NO<sub>x</sub>) baseou-se no procedimento técnico “PT(A) 5.4.2 –Determinação dos teores em CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> com o analisador de gases TESTO 350<sup>23</sup>” em vigor, à data de realização do presente trabalho, no LNEG (LNEG, 2005). Na Figura 5.5 é apresentado um diagrama geral da metodologia adoptada.

---

<sup>23</sup> Baseado na NP ISO 10396:1998 – Emissões de fontes fixas. Amostragem para a determinação da concentração de gases por métodos automáticos; ISO 12039:2001 – Stationary source emissions. Determination of carbon monoxide, carbon dioxide and oxygen. Performance characteristics and calibration of automated measuring systems; Manual do equipamento TESTO 350.



**Figura 5.5 – Diagrama geral da metodologia adoptada na recolha de amostras de O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> com o TESTO 350 e TESTO 339. Adaptado de LNEG, 2005**

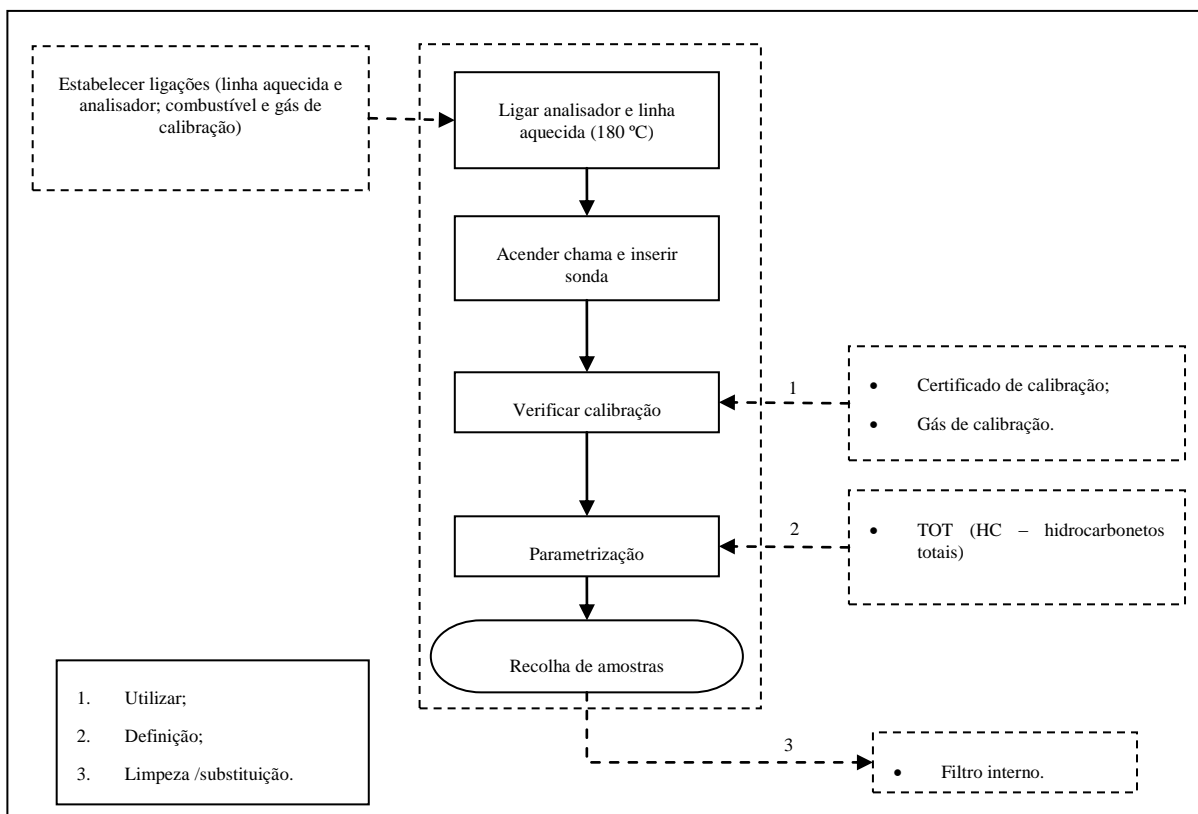
A aquisição de dados referentes à amostragem de gases (O<sub>2</sub>, CO e NO<sub>x</sub>) foi realizada de forma automática, de 30 em 30 segundos. No Anexo 3 são apresentados os dados resultantes da amostragem de NO<sub>x</sub>, CO e O<sub>2</sub> para o gasóleo de origem fóssil e cada uma das misturas volumétricas de biocombustíveis estudadas.

O teor em CO<sub>2</sub> dos gases de escape foi calculado através da realização de um balanço de massa.

## Hidrocarbonetos (HC)

A amostragem de HC foi realizada de acordo com o manual do 3030PM e o método US EPA 25-A (metodologia para determinação de hidrocarbonetos gasosos) e método US EPA 1 (distância mínima do ponto de amostragem relativamente a qualquer fonte de perturbação do fluxo gasoso - Figura 5.4). Na Figura 5.6 é apresentado um diagrama geral da metodologia adoptada.





**Figura 5.6 – Diagrama geral da metodologia adoptada na recolha de amostras de HC com o 3030PM.**

**Adaptado de Signal Group, 2003; US EPA, método 25A**

Utilizou-se 100% H<sub>2</sub> como combustível para o 3030PM. Realizou-se a amostragem no ponto central do tubo de escape, utilizando-se uma sonda com uma única entrada. A concentração obtida, em base húmida, foi convertida para base seca usando a Eq. 5.6.

$$C_{HC,b.s.,} = \left[ \frac{C_{HC,b.h.}}{\left( \frac{100\% - \% H_2O}{100\%} \right)} \right] \quad \text{Eq. 5.6}$$

$C_{HC,b.h.,}$  concentração HC medida (ppm, base húmida);  $C_{HC,b.s.,}$  concentração HC (ppm, base seca); % H<sub>2</sub>O, teor de humidade (v/v) nos gases de escape (calculado no balanço de massa)

A aquisição de dados referentes à amostragem de HC foi realizada de forma manual. No Anexo 5 são apresentados os dados resultantes da amostragem de HC para o gasóleo de origem fóssil e cada uma das misturas volumétricas de biocombustível estudadas.

## Partículas Totais em Suspensão

A metodologia de recolha de amostras de partículas totais em suspensão (PTS) consistiu numa amostragem isocinética, baseando-se esta nos métodos US EPA indicados na Quadro 5-10.

**Quadro 5-10 - Descrição dos métodos US EPA nos quais se baseou a amostragem de PTS e os desvios e/ou notas do procedimento adoptado face aos mesmos**

Método USEPA	Objectivo	Notas
1A	Localização e determinação do n.º dos pontos de amostragem	<ul style="list-style-type: none"> <li>Um único ponto de amostragem;</li> <li>Monitorização da temperatura do efluente gasoso entre a sonda/nozzle e o tubo de Pitot S.</li> </ul>
2	Determinação da velocidade média do efluente gasoso (Eq. 5.7) na conduta de escape e quantificação do respectivo caudal volumétrico (Eq. 5.8) (através de medições de pressão estática e dinâmica com tubo de Pitot S)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Assumiu-se um coeficiente do tubo de Pitot S de 0,84.</li> </ul>
3	Determinação do peso molecular dos gases, em base seca, presentes no efluente gasoso (Eq. 5.9)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Através da medição de O<sub>2</sub> e CO e cálculo no balanço de massa de CO<sub>2</sub>, com posterior cálculo estequiométrico.</li> </ul>
4	Determinação do teor de humidade do efluente gasoso (Eq. 5.10)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adoptou-se o método de referência.</li> </ul>
17	Determinação das emissões de partículas através de amostragem isocinética (Eq. 5.11)	<ul style="list-style-type: none"> <li>O porta-filtros bloqueia uma área &gt; 5% da área transversal da conduta de escape, pelo que se localiza fora da mesma (devidamente acondicionado).</li> <li>Filtros Whatman tipo "thimble", ou dedal em fibra de vidro (19x90 mm);</li> </ul>

$$v_s = K_s \times C_p \times \sqrt{\Delta P_{avg}} \times \sqrt{\frac{T_s}{P_s \times M_s}} \quad \text{Eq. 5.7}$$

$v_s$ , velocidade média dos gases (m/s);  $K_s$ , constante de velocidade do Pitot (34,97 m/s[(g/mol)(mmHg)]/[l(K)(mmH<sub>2</sub>O)]<sup>1/2</sup>);  $C_p$ , coeficiente do Pitot (0,84);  $\Delta P_{avg}$ , diferencial de pressão na conduta (mmH<sub>2</sub>O);  $T_s$ , temperatura dos gases na conduta (K);  $P_s$ , pressão absoluta na conduta (mmHg);  $M_s$ , peso molecular dos gases, base húmida (g/mol)

$$Q = 3600 \times (1 - B_{ws}) \times v_s \times A \times \left( \frac{T_{std} \times P_s}{T_s \times P_{std}} \right) \quad \text{Eq. 5.8}$$

$Q$ , caudal de gás seco corrigido para condições de referência (Nm<sup>3</sup>/h);  $B_{ws}$ , vapor de água no efluente gasoso (%vol);  $A$ , área da secção da conduta (m<sup>2</sup>);  $T_{std}$ , temperatura de referência (273,15 K);  $P_{std}$ , pressão absoluta de referência (760 mmHg).

$$M_s = M_d \times (1 - B_{ws}) + 18,0 \times B_{ws}$$

Md, peso molecular dos gases, base seca (g/mol)

$$M_d = 0,440 \times (\%CO_2) + 0,320 \times (\%O_2) + 0,280 \times (\%N_2 + \%CO) \quad \text{Eq. 5.9}$$

$$\%N_2 = 100 - (\%O_2 + \%CO_2 + \%CO)$$

$$B_{ws} = \frac{V_{w(std)}}{V_{m(std)} + V_{w(std)}} \quad \text{Eq. 5.10}$$

$$V_{w(std)} = \frac{V_{lc} \times \rho_w \times R \times T_{std}}{P_{std} \times M_w} \quad V_{m(std)} = \frac{V_m \times Y \times T_{std} \times \left( P_{bar} + \left( \frac{\Delta H}{13,6} \right) \right)}{P_{std} \times T_m}$$

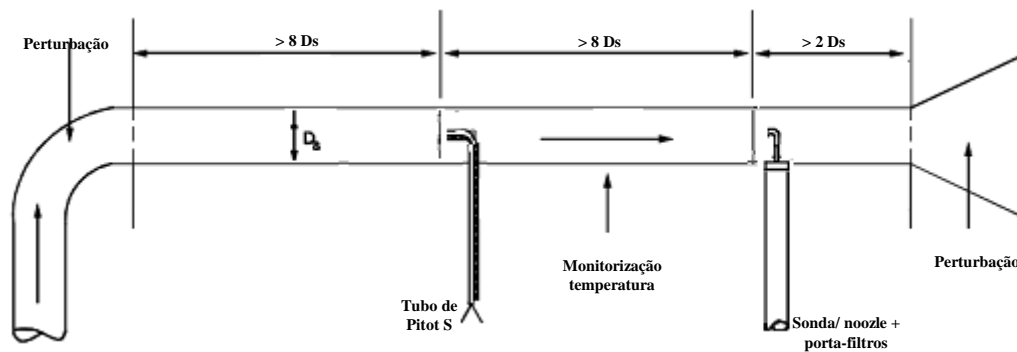
$V_{m(std)}$ , volume de gás seco corrigido para as condições standard ( $m^3$ );  $V_{w(std)}$ , volume de vapor de água condensado nas condições padrão ( $m^3$ );  $V_{lc}$ , volume de vapor de água condensado (ml);  $\rho_w$ , densidade da água (0,9982 g/ml);  $R$ , constante dos gases ideais (0,06236 mmHg $m^3$ /gmolK);  $M_w$ , peso molecular da água (18,0 g/gmol);  $V_m$ , volume de gás medido no caudalímetro ( $m^3$ );  $Y$ , factor de calibração do caudalímetro;  $T_m$ , temperatura média do caudalímetro (K);  $P_{bar}$ , pressão barométrica (mmHg);  $\Delta H$ , diferencial de pressão na sonda de amostragem/orifício (mmH<sub>2</sub>O).

$$C_{PTS} = \frac{m_n}{V_{m(std)}} \quad Q_s = \frac{C_{PTS}}{Q} \quad \text{Eq. 5.11}$$

$C_{PTS}$ , concentração de PTS (mg/Nm<sup>3</sup>);  $m_n$ , massa de PTS (mg);  $Q_s$ , caudal mássico de emissão de PTS (Nm<sup>3</sup>/h).

Para a determinação da localização do ponto de amostragem, tubo de Pitot S e sonda/nozzle, utilizou-se o método 1A devido ao diâmetro da conduta (aproximadamente 0,105 metros) se enquadrar no seu limite de aplicação (condutas com  $0,10 \text{ m} \leq \text{diâmetro} < 0,30 \text{ m}$ ). A amostragem de PTS é realizada na conduta de escape, por não ser possível aplicar no tubo de escape do motor o comprimento da distância mínima do ponto de amostragem, tubo de Pitot S e sonda/nozzle, relativamente a qualquer fonte de perturbação do fluxo gasoso, mencionada no método 1A.

Optou-se por realizar a amostragem num único local (ponto central da conduta) por considerar-se que este representa o pior cenário em termos da concentração de partículas no fluxo gasoso. Na Figura 5.7 é apresentada uma figura representativa da localização da sonda/nozzle e do tubo de Pitot S na conduta de extracção.



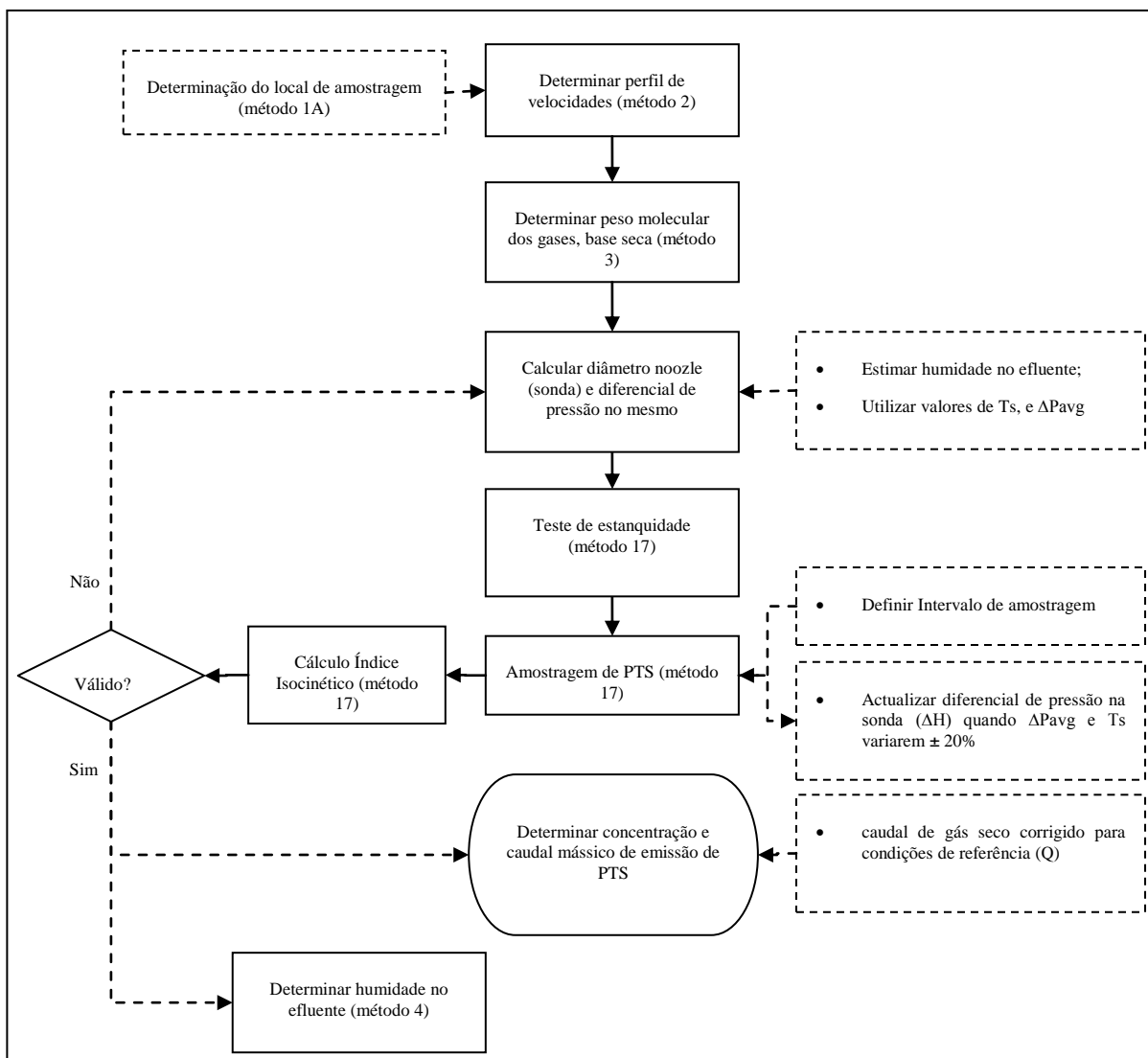
**Figura 5.7 - Amostragem de PTS (localização sonda/noozle, porta-filtros, tubo de Pitot S e termopar k para monitorização da temperatura do efluente gasoso) na conduta. Figura adaptada de US EPA, método**

**1A.  $D_s$ , diâmetro da conduta**

Para calcular o diâmetro do bocal da sonda (noozle) e do valor do  $\Delta H$  foi utilizada a régua de Anderssen. O procedimento adoptado baseou-se nos seguintes passos:

- Mover a régua de forma a que o “INDEX” aponte para o valor de referência;
- Para cada parâmetro mover a “hairline” para o valor de referência e de seguida mover a régua de forma a que o novo valor fique por baixo da “hairline”:
  - Parâmetros para determinação do diâmetro da sonda:  $T_s$ ,  $B_{ws}$  e  $\Delta P_{avg}$ ;
  - Parâmetros para determinação do valor do  $\Delta H$ :  $T_s$ , diâmetro do noozle,  $B_{ws}$  e  $\Delta P_{avg}$ .
- No final obtém-se o valor pretendido (diâmetro do bocal da sonda ou o valor do  $\Delta H$ ).

Na Figura 5.8 é apresentado o diagrama geral da metodologia adoptada:



**Figura 5.8 - Diagrama geral da metodologia adoptada na amostragem isocinética de PTS. Adaptado de US EPA, método 1A; US EPA, método 2; US EPA, método 3; US EPA, método 4; US EPA, método 17**

A validade da amostragem isocinética pode ser verificada através do índice de isocinetismo,  $I$ , (ver Eq. 5.12). A amostra é representativa quando  $I=100 \pm 10\%$ . Sempre que a amostragem for realizada em condições sobre-isocinéticas ( $I > 110\%$ ) ou condições sub-isocinéticas ( $I < 90\%$ ), o ensaio deverá ser eliminado (USEPA, método 17).

$$I = \frac{100 \times T_s \times \left[ K_4 \times V_{lc} + \left( \frac{V_m \times Y}{T_m} \right) \times \left( P_{bar} + \frac{\Delta H}{13,6} \right) \right]}{60 \times \theta \times v_s \times P_s \times A_n} \quad \text{Eq. 5.12}$$

I, índice de isocinetismo (%);  $T_s$ , temperatura na conduta (K);  $\theta$ , tempo de amostragem (min);  $A_n$ , área da secção do bocal do noozle (m<sup>2</sup>); 13,6 = densidade do mercúrio;  $K_4 = 0,003454$  [(mmHg)(m<sup>3</sup>)]/[(ml)(K)]

Antes e após a realização da amostragem de PTS os filtros foram pesados, após secagem durante mais de 24 horas num exsiccador a  $20 \pm 5$  °C, até se obter um valor constante de  $\pm 0,5$  mg da pesagem anterior.

O teor de O<sub>2</sub> (%) nos gases de escape no ponto de amostragem de PTS foi calculado mediante a Eq. 5.13.

$$O_2 (\%) = \frac{\left[ 0,21 \times (C_{GSf} - C_{GSi}) + \left( C_{O2v} \times \left( 1 - \left( \frac{C_{GSf} - C_{GSi}}{C_{GSf}} \right) \right) \right) \right]}{C_{GSf}} \times 100 \quad \text{Eq. 5.13}$$

0,21, teor de O<sub>2</sub> em volume no ar troposférico;  $C_{GSf}$ , caudal de gás seco existente durante a recolha de PTS (Nm<sup>3</sup>/h);  $C_{GSi}$ , caudal de gás seco existente durante a amostragem de gases (calculado no balanço de massa) (Nm<sup>3</sup>/h);  $C_{O2v}$ , caudal de O<sub>2</sub> existente durante a amostragem de gases (calculado no balanço de massa) (Nm<sup>3</sup>/h)

No Anexo 4 são apresentados os dados resultantes da amostragem de PTS para o gasóleo de origem fóssil e cada uma das misturas volumétricas de biocombustível estudadas.

### 5.2.3 Temperatura, pressão e humidade relativa

A temperatura ambiente e a humidade relativa na entrada do ar de admissão no motor foram medidas de acordo com a ISO 1585:1992.

A temperatura dos gases de escape foi medida no ponto de recolha de amostras de gases no tubo de escape, ou seja a cerca de 0,43 metros da saída do efluente gasoso e a 0,11 metros de qualquer fonte de perturbação do fluxo do efluente gasoso a jusante.

No Anexo 6 são apresentados os dados resultantes da amostragem da temperatura dos gases de escape e temperatura ambiente na entrada do ar no motor para o gasóleo de origem fóssil e cada uma das misturas volumétricas de biocombustível estudadas.

## 5.2.4 Balanço de massa e eficiência térmica

### 5.2.4.1 Balanço de massa

Foi realizado um balanço de massa para se obter as concentrações de CO<sub>2</sub> (ver Eq. 5.14) nos gases de escape (constituídos por CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e N<sub>2</sub>; não se considera SO<sub>2</sub> por não se ter identificado S na composição do gasóleo e biocombustíveis utilizados), o caudal seco dos gases de escape (C<sub>GS</sub> – Nm<sup>3</sup>/h), resultante do somatório do caudal de emissão de cada um dos gases de escape subtraído do caudal de H<sub>2</sub>O, e o caudal de gás húmido (C<sub>GH</sub> – Nm<sup>3</sup>/h), somatório do caudal de emissão de cada um dos gases de escape.

$$Conc_{CO_2} = \left( \frac{C_{CO_2m}}{C_{GS}} \right) \times 1000 \quad \text{Eq. 5.14}$$

Conc<sub>CO<sub>2</sub></sub>, concentração de CO<sub>2</sub> nos gases de escape (g/Nm<sup>3</sup>); C<sub>CO<sub>2</sub></sub>, caudal de emissão de CO<sub>2</sub> (kg/h); C<sub>GS</sub>, caudal de gás seco existente durante a amostragem de gases (Nm<sup>3</sup>/h)

A concentração de CO<sub>2</sub> foi corrigida para um teor de oxigénio de referência (8%), de acordo com a Eq. 5.4. O teor de oxigénio nos gases de escape foi calculado utilizando a Eq. 5.15.

$$\%O_2 = \left( \frac{C_{O_2}}{C_{GS}} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 5.15}$$

% O<sub>2</sub>, teor de O<sub>2</sub> nos gases de escape (%); C<sub>CO<sub>2</sub></sub>, caudal de emissão de O<sub>2</sub> (Nm<sup>3</sup>/h); C<sub>GS</sub>, caudal de gás seco existente durante a amostragem de gases (Nm<sup>3</sup>/h)

O caudal de emissão, C<sub>EGv</sub> (em volume), de cada um dos gases de escape foi determinado de acordo com a Eq. 5.16.

$$C_{EGv} = \left( \frac{C_{EGm} \times 1000 \times R \times T}{M \times P} \right) \quad \text{Eq. 5.16}$$

C<sub>EGv</sub>, caudal de emissão do gás em volume (Nm<sup>3</sup>/h); C<sub>EGm</sub>, caudal de emissão do gás em massa (kg/h); R, constante dos gases perfeitos (8,314 Jmol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>); T, temperatura em CNPT (273,15 K); M, massa molar (g/mol); P, pressão em CNPT (100 000 Pa).

O caudal de emissão,  $C_{EGm}$  (em massa), de cada um dos gases de escape foi determinado de acordo com as Eq. 5.17 a Eq. 5.21.

$$C_{CO_2m} = \left[ \left( C_{comb} \times \frac{\%C}{100} \right) \times \frac{44}{12} \right] \quad \text{Eq. 5.17}$$

$C_{CO_2m}$ , caudal de emissão de  $CO_2$  (kg/h);  $C_{comb}$ , consumo de combustível (kg/h);  
 $\%C$ , proporção de C no combustível (%)

$$C_{O_2m} = \left[ (C_{ar seco} \times 0,23) + \left( C_{comb} \times \frac{\%O}{100} \right) - \left( C_{H_2Om} \times \frac{16}{18} \right) - \left( C_{CO_2m} \times \frac{32}{44} \right) \right] \quad \text{Eq. 5.18}$$

$C_{O_2m}$ , caudal de emissão de  $O_2$  (kg/h);  $C_{ar seco}$ , caudal de ar seco que entra no sistema (kg/h);  $C_{comb}$ , consumo de combustível (kg/h);  $\%O$ , proporção de O no combustível (%);  $C_{H_2Om}$ , caudal de emissão de  $H_2O$  (kg/h);  $C_{CO_2m}$ , caudal de emissão de  $CO_2$  (kg/h)

$$C_{H_2Om} = \left[ (C_{ar seco} \times Humidade_{ambiente}) + \left( C_{comb} \times \frac{\%Humidade}{100} \right) + \left( \frac{\%H}{100} \times \frac{18}{2} \right) \right] \quad \text{Eq. 5.19}$$

$C_{H_2Om}$ , caudal de emissão de  $H_2O$  (kg/h);  $C_{ar seco}$ , caudal de ar seco que entra no sistema (kg/h);  $Humidade_{ambiente}$ , humidade no ar ambiente (kg $H_2O$ /kg $_{ar seco}$ );  $C_{comb}$ , consumo de combustível (kg/h);  $\%Humidade$ , proporção de humidade no combustível (%);  $\%H$ , proporção de H no combustível (%);

$$C_{N_2m} = \left[ (C_{ar seco} \times 0,77) + \left( C_{comb} \times \frac{\%N}{100} \right) \right] \quad \text{Eq. 5.20}$$

$C_{N_2m}$ , caudal de emissão de  $N_2$  (kg/h);  $C_{ar seco}$ , caudal de ar seco que entra no sistema (kg/h);  
 $C_{comb}$ , consumo de combustível (kg/h);  $\%N$ , proporção de N no combustível (%);

$$C_{ar seco} = \left[ 1 + \frac{\%O_{2gasesescape}}{(20,8 - \%O_{2gasesescape})} \right] \times \left[ \left( \frac{(C_{comb} \times \%C) \times 32}{12} \right) + \left( \frac{(C_{comb} \times \%H) \times 16}{2} \right) - \left( \frac{(C_{comb} \times \%O)}{100} \right) \right] \quad \text{Eq. 5.21}$$

$C_{ar seco}$ , caudal de ar seco que entra no sistema (kg/h);  $\%O_{2gasesescape}$ , teor de oxigénio medido nos gases de escape (%);  $C_{comb}$ , consumo de combustível (kg/h);  $\%C$ , proporção de C no combustível (%);  $\%H$ , proporção de H no combustível (%);  $\%O$ , proporção de O no combustível (%);

O teor de humidade nos gases de escape utilizado para converter a concentração de HC obtida (de base húmida para base seca) foi calculado utilizando a Eq. 5.22.

$$\%H_2O = \left[ \frac{C_{H_2Ov}}{C_{GH}} \right] \times 100 \quad \text{Eq. 5.22}$$

$\%H_2O$ , teor de humidade (v/v) nos gases de escape;  $C_{H_2Ov}$ , caudal de emissão de  $H_2O$  em volume (Nm<sup>3</sup>/h);  $C_{GH}$ , caudal de gás húmido existente durante a amostragem de gases (Nm<sup>3</sup>/h) (calculado no balanço de massa)



No Anexo 8 são apresentados os dados resultantes da realização do balanço de massa para o gásóleo de origem fóssil e cada uma das misturas volumétricas de biocombustível estudadas.

#### 5.2.4.2 Rendimento do motor

O rendimento do motor utilizado foi calculado de acordo com a Eq. 5.23, ou seja, a razão entre a potência que saiu do sistema e a potência introduzida no sistema. Esta última corresponde ao produto entre o caudal de consumo de combustível,  $C_{comb}$  (kg/h) e o PCI do combustível (kJ/kg) (Lapuerta *et al.*, 2008).

$$\eta_{Motor} = \frac{P_e}{\left( \frac{C_{comb} \times PCI}{3600} \right)} \quad \text{Eq. 5.23}$$

Página Propositadamente Deixada em Branco

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não foi possível no presente trabalho repetir os ensaios realizados, tornando-se portanto necessária a futura execução dos mesmos, na perspectiva de um projecto continuado, para validação dos resultados a seguir apresentados. A discussão dos resultados obtidos será realizada através da comparação com resultados apresentados na literatura. No Quadro 6-1 e Quadro 6-2 são indicadas as datas de realização dos ensaios e as condições ambiente existentes durante a realização dos ensaios, nomeadamente a temperatura de entrada de ar no motor, a humidade relativa na entrada do ar e a pressão atmosférica do laboratório.

**Quadro 6-1 – Datas de realização dos ensaios e respectivas condições ambiente existentes. HR, humidade relativa; T, temperatura;  $P_{atm}$ , pressão atmosférica.**

	B15.1.I	B15.1.II	B15.1.III	B30.1.I	B30.1.II	B30.1.III
<b>Data e hora de início</b>	15/09/2009, 15h25m	15/09/2009, 16h10m	15/09/2009, 16h55m	22/09/2009, 16h42m	22/09/2009, 17h02m	22/09/2009, 17h23m
<b>HR entrada do ar (%)</b>	22,7%	21,7%	19,6%	18,6%	17,6%	15,8%
<b>T média entrada ar (°C)</b>	37,38	42,59	47,68	43,07	45,37	52,47
<b>Patm (kPa)</b>	100,80	100,80	100,80	100,40	100,40	100,40

**Quadro 6-2 - Datas de realização dos ensaios e respectivas condições ambiente existentes. HR, humidade relativa; T, temperatura;  $P_{atm}$ , pressão atmosférica (continuação)**

	B0.I	B0.II	B0.III	B15.2.I	B15.2.II	B15.2.III	B30.2.I	B30.2.II	B30.2.III
<b>Data e Hora de início</b>	17/09/2009, 10h15m	17/09/2009, 14h50m	17/09/2009, 15h55m	22/09/2009, 10h00m	22/09/2009, 11h00m	22/09/2009, 12h10m	22/09/2009, 15h05m	22/09/2009, 15h28m	22/09/2009, 15h53m
<b>HR entrada do ar (%)</b>	29,5%	20,0%	17,0%	26,5%	20,5%	18,4%	20,0%	18,5%	17,0%
<b>T média entrada ar (°C)</b>	32,88	41,11	48,20	34,79	40,58	50,20	40,53	44,90	53,57
<b>Patm (kPa)</b>	100,80	100,80	100,80	100,40	100,40	100,40	100,40	100,40	100,40

## 6.1 Potência

No Quadro 6-3 é indicada a pressão média efectiva (pme) e a potência associada a cada condição de ensaio (após correcção dos valores do dinamómetro).

**Quadro 6-3 – pme e potência observados em cada condição de ensaio**

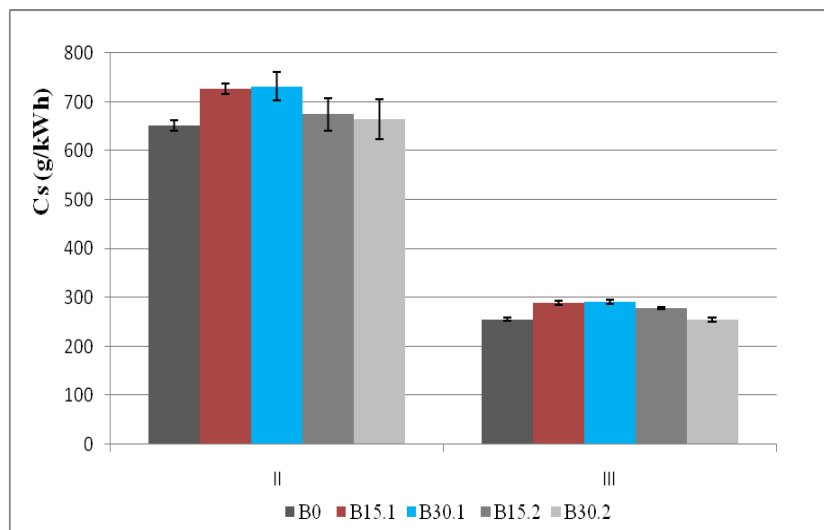
	PME (MPa)	Potência (kW)
I	0,0	0,0
II	0,1	5,0
III	0,4	20,0

Na condição I, uma vez que não existia carga de binário, a potência obtida foi nula. A análise das emissões de poluentes será realizada com base nas emissões específicas (g/kWh).

Os ensaios decorreram a valores de baixa (5 kW) e média (20 kW) potência, comparando com a potência máxima indicada pelo fabricante do motor utilizado (43 kW a 4400 rpm).

## 6.2 Consumo específico e rendimento do motor

Na Figura 6.1 é apresentado o consumo específico para as condições II e III para os diferentes combustíveis utilizados. Não são apresentados os valores para a condição I, uma vez que para essas condições a potência obtida foi nula.



**Figura 6.1 – Consumo específico médio (Cs) nas condições II e III (as barras a preto indicam o desvio padrão)**

Verifica-se uma diminuição do consumo específico quando se passa de uma potência de 5 kW para uma potência de 20 kW. Este resultado é concordante com os ensaios de biocombustível de primeira geração, realizados por Ozkan (2007) num motor de combustão interna por compressão semelhante (motor de 4 cilindros, debitando 44 kW de potência a 3500 rpm). O ensaio descrito por este autor decorreu a potências compreendidas entre cerca de 9 kW e cerca de 43 kW, verificando-se um aumento gradual no consumo específico após a potência de cerca de 15 kW (biocombustível 1ª geração; pme = 0,68 MPa; N= 1500 rpm) e cerca de 18 kW (gasóleo; pme = 0,82 MPa; N= 1500 rpm). No entanto, a potências compreendidas entre os cerca de 9 kW (pme = 0,60 MPa; N= 1000 rpm) e os cerca de 15 kW e 18 kW referidos, verificou-se uma diminuição no consumo específico, de cerca de 5% e 4,5%, para o gasóleo e biocombustível, respectivamente. Mesmo a potências de 22,5 kW, obtidos durante a utilização de biocombustível 1ª geração (pme = 0,77 MPa; N= 2000 rpm), e 27,8 kW, obtidos durante a utilização de gasóleo (pme = 0,95 MPa; N= 2000 rpm), verificou-se uma diminuição no consumo específico de cerca de 1,7% e 1,5%, de gasóleo e biocombustível, comparativamente à potência inicial de funcionamento do motor (9 kW).

Em ambas as condições de ensaio apresentadas (II e III) as misturas B15.1 e B30.1 apresentaram resultados estatisticamente diferentes do B0 ( $p^{24} = 95\%$ ), apresentando um consumo específico superior, de cerca de 13% e 14%, respectivamente, mas não apresentando diferenças significativas entre si. As misturas B15.2 e B30.2 para ambas as condições de ensaio apresentaram um consumo específico sem diferenças significativas comparativamente com o B0, verificando-se na condição de ensaio III (20 kW) uma diminuição de cerca de 10%, quando se passou de B15.2 para B30.2. À potência de 20 kW a mistura B30.2 apresentou um consumo específico menor do que B15.1 e B30.1, de cerca de 12% e 13%, respectivamente. A mistura B15.2 não apresentou uma diferença significativa comparativamente às misturas B15.1 e B30.1 ( $p = 95\%$ ). Os resultados obtidos para as misturas que incorporavam biocombustível de primeira geração foram concordantes com os resultados obtidos por outros autores: i) Ozkan (2007) verificou um aumento no consumo específico aquando da combustão de biocombustível de primeira geração, de pelo menos 9,6%, comparativamente à combustão de gasóleo; ii) Hansen & Jensen (1997) verificaram um aumento de cerca de 14% no consumo específico aquando da utilização de biocombustível de primeira geração proveniente de óleo de colza num motor de 6 cilindros e 170 kW de potência.

O maior consumo específico das misturas com biocombustíveis de primeira geração será uma compensação do sistema para manter a potência exigida, uma vez que estas apresentam um menor PCI (Lapuerta, 2008). Gabroski *et al.* (1996) apresentou uma correlação positiva entre o teor de oxigénio e o aumento do consumo de combustível (misturas de 20%, 35%, 65% e 100% de biocombustível proveniente de óleo de soja), mostrando desta forma que o oxigénio presente na composição do combustível pode ser um indicador da diminuição do PCI desse mesmo combustível. No caso do presente trabalho, verifica-se que são as misturas com incorporação de biocombustível de primeira geração, e consequentemente com um maior teor em oxigénio na composição das mesmas, as que apresentam um menor PCI e maiores valores de consumo específico, comparativamente ao B0, apesar de não se verificarem diferenças entre B15.1 e B30.1. Será útil realizar em trabalhos futuros ensaios com misturas de

20% e 50% de incorporação de biocombustível, de forma a verificar a existência desta tendência. No que respeita às misturas dos biocombustíveis de segunda geração, a não existência de diferenças significativas, no consumo específico, entre estas e o B0 e a diminuição apresentada por B30.2 quando comparado com B15.2, cerca de 10% ( $p=95\%$ ), poderá resultar do aumento do PCI, relacionado com o aumento do teor em hidrogénio na composição das mesmas.

No Quadro 6-4 são apresentados os resultados do rendimento do motor calculados para cada ensaio realizado.

**Quadro 6-4 – Rendimento do motor obtido em cada um dos ensaios**

Condição de ensaio	B0	B15.1	B30.1	B15.2	B30.2
I	-	-	-	-	-
II	12,9%	11,7%	12,2%	12,4%	12,6%
III	33,1%	29,7%	31,1%	30,2%	32,9%

O rendimento do motor aumentou quando se passou de uma potência de 5 kW para 20 kW, tendência também registada por Di *et al.* (2009) que utilizou misturas até 80% de incorporação de biocombustível de primeira geração, num motor a 4 cilindros, a potências compreendidas entre cerca de 5 kW e cerca de 23 kW. A evolução do rendimento do motor apresenta uma relação inversamente proporcional à evolução do consumo específico. Esta tendência também foi registada por Ozkan (2007).

As maiores eficiências (rendimento do motor), à potência de 5kW e 20 kW, foram obtidas utilizando B0 e B30.2. O aumento no rendimento do motor entre B15.1 e B30.1 pode ser explicada pelo aumento no teor de oxigénio no combustível que irá melhorar a combustão, ao nível da combustão por difusão (Ramadhas *et al.*, 2005) e pela diminuição do PCI da mistura. As misturas com incorporação do biocombustível de segunda geração apresentaram um rendimento do motor superior às misturas com incorporação de biocombustível de primeira geração, verificando-se similarmente um aumento significativo entre B15.2 e B30.2 na condição III. Este aumento poderá resultar do menor consumo verificado em B30.2 comparativamente a B15.2.

A análise da emissão dos gases de escape, apesar de ser apresentada a evolução ao longo das três condições de ensaio, será realizada ao nível da condição III, por ser esta a situação que o motor esteve em funcionamento mais próximo das condições óptimas (maior rendimento do motor).

### 6.3 Emissão de óxidos de azoto

Os resultados referentes às emissões de NO<sub>x</sub> para os ensaios realizados nas diferentes condições são apresentadas na Figura 6.2. Os valores mais elevados foram registados na situação da condição I (“ponto morto”) e III (potência máxima). Na Figura 6.3 são apresentados os valores da temperatura média dos gases de escape. O aumento de emissões e temperatura dos gases de escape registado entre a condição de ensaio II e III segue a mesma tendência dos resultados apresentados por Koçak *et al.* (2007) que, num motor de 4 cilindros, numa potência de 82 kW a 3850 rpm, testou biocombustível de primeira geração (B100) de 3 proveniências diferentes, a várias velocidades de funcionamento. Este autor verificou um aumento da emissão de NO<sub>x</sub> e da temperatura dos gases de escape à medida que a potência de funcionamento do motor aumentava, entre a velocidade de 1750 rpm e 3000 rpm.

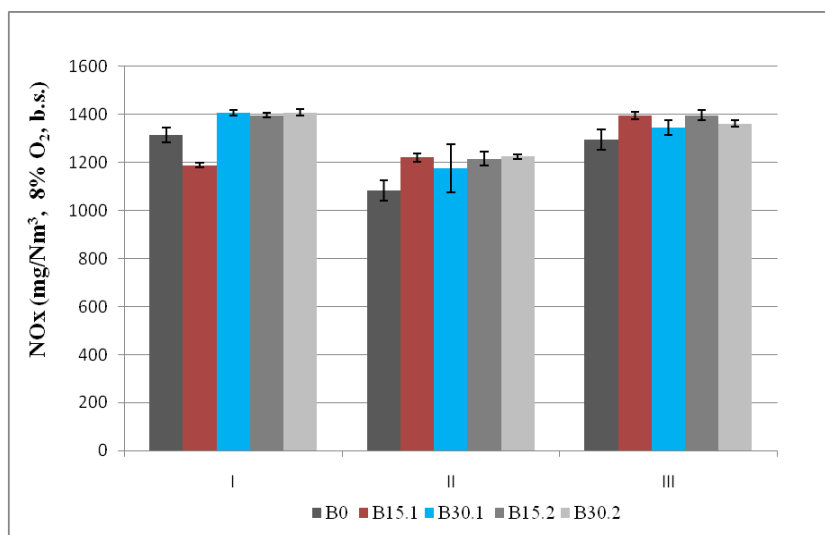
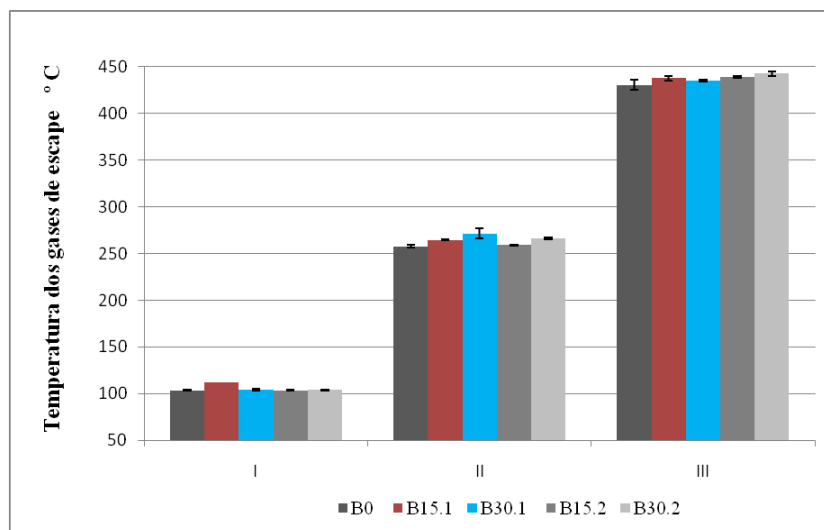


Figura 6.2 - Emissões médias de NO<sub>x</sub> (mg/Nm<sup>3</sup>) corrigidas para um teor de 8% de O<sub>2</sub> e base seca (as barras a preto indicam o desvio padrão)





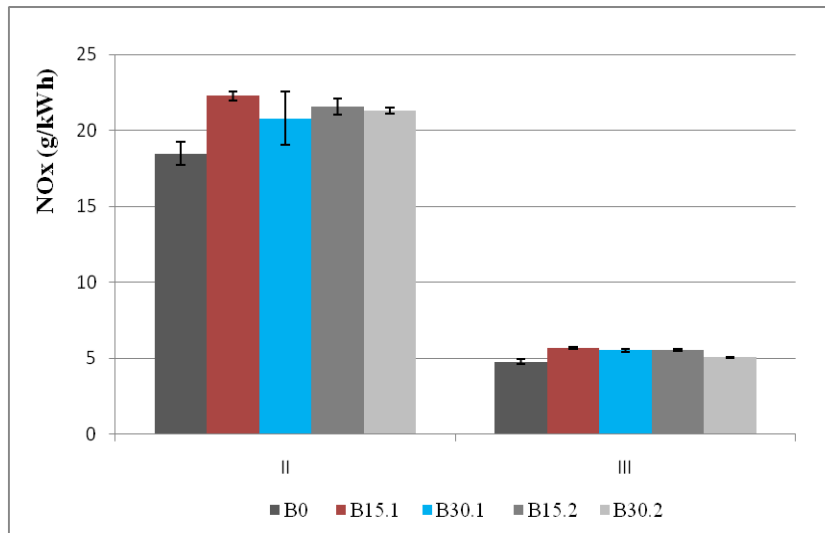
**Figura 6.3 – Temperatura média dos gases de escape para cada mistura (as barras a preto indicam o desvio padrão)**

Nas emissões específicas de NO<sub>x</sub> ( Figura 6.4) verificou-se uma diminuição quando se passou de 5 kW para 20 kW, tendência que também foi verificada por Murillo *et al.* (2007). Este autor utilizou várias misturas volumétricas de biocombustível de primeira geração (B10, B30, B50 e B100) num motor de 2 cilindros (18 kW de potência a 3450 rpm), observando uma diminuição generalizada das emissões à medida que a velocidade e a carga (pme)eram aumentadas.

Di *et al.* (2009) a potências semelhantes às obtidas no presente ensaio verificou que as emissões específicas de NO<sub>x</sub> diminuíram com o aumento da carga aplicada no motor e que esta diminuição era mais óbvia a menores valores de carga (pme). Também observou que quanto maior o teor de oxigénio na composição das misturas, maior o aumento da emissão específica de NO<sub>x</sub>, tendo sido a mistura B80 a que apresentou os maiores valores à pressão média efectiva de 0,38 MPa, 0,55 MPa e 0,67 MPa.

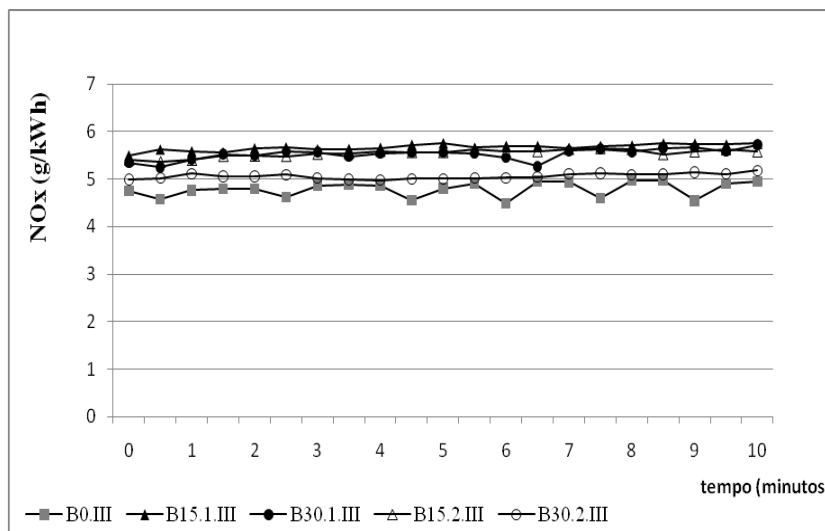
No seu trabalho, Murillo *et al.*, (2007) argumentou que a diminuição, verificada nos seus resultados à medida que se aumentava a potência de funcionamento do motor, poderia dever-se ao aumento da turbulência no interior do cilindro, o que contribuiria para uma combustão mais rápida e um menor tempo de residência das espécies químicas nas zonas de elevada temperatura. Nos resultados obtidos no presente trabalho, verificou-se no entanto que a diminuição da emissão específica de NO<sub>x</sub> registada entre as

condições de ensaio II e III é inversamente proporcional ao aumento de potência verificada entre as duas condições (5 kW para 20 kW).

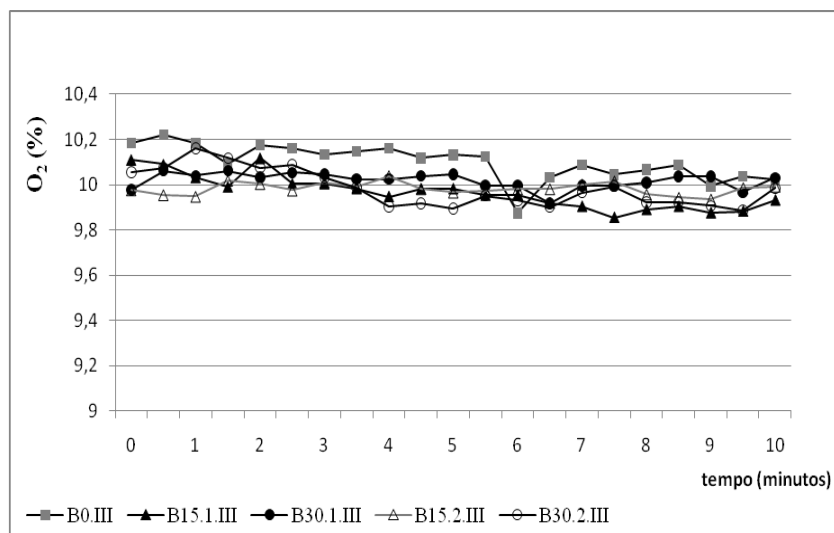


**Figura 6.4 - Emissões específicas médias de NOx (g/kWh) para as condições de ensaio II e III (as barras a preto indicam o desvio padrão)**

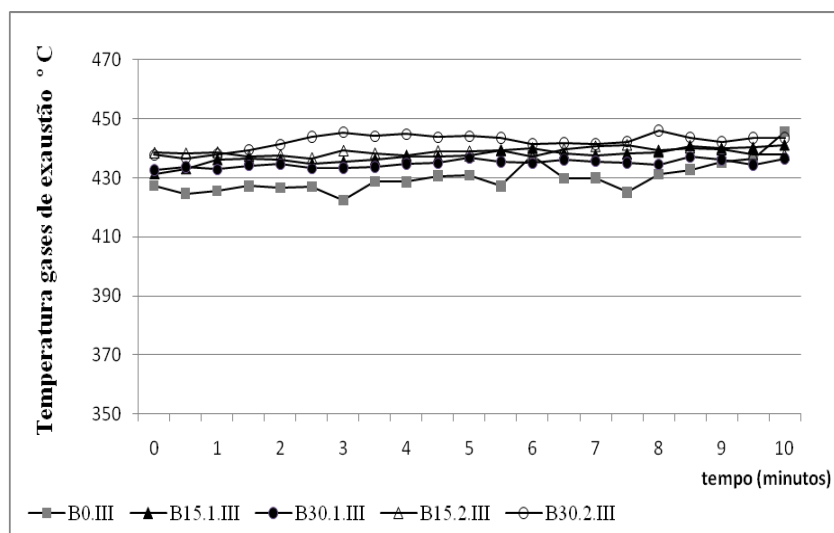
Na Figura 6.5, Figura 6.6 e Figura 6.7, são apresentadas a variação de emissão de NOx, do teor de O<sub>2</sub> (%) e da temperatura nos gases de escape durante o período de amostragem, verificadas durante a condição de ensaio III.



**Figura 6.5 - Variação da emissão de NOx (g/kWh) ao longo do período de amostragem (condição de ensaio III)**



**Figura 6.6 – Variação do teor de O<sub>2</sub> (%) nos gases de escape durante o período de amostragem (condição de ensaio III)**



**Figura 6.7 – Variação da temperatura (°C) dos gases de escape durante o período de amostragem (condição de ensaio III)**

As misturas B15.1, B30.1, B15.2 e B30.2 apresentaram emissões de NO<sub>x</sub> superiores ao B0 (p=95%). No Quadro 6-5 são indicadas as diferenças significativas verificadas à potência média do motor (condição de ensaio III).

**Quadro 6-5 - Diferenças verificadas entre as diferentes misturas (p=95%) na condição de ensaio III**

	<b>B0</b>	<b>B15.1</b>	<b>B30.1</b>	<b>B15.2</b>	<b>B30.2</b>
<b>B15.1</b>	18%	n.a.	--	--	--
<b>B30.1</b>	15%	-3%	n.a.	--	--
<b>B15.2</b>	16%	-2%	--	n.a.	--
<b>B30.2</b>	6%	-11%	-8%	-9%	n.a.

O aumento das emissões de NO<sub>x</sub> de B15.1 e B30.1, 18% e 15%, respectivamente, face ao B0 aos quais estão associados valores de temperatura mais elevados e menores teores de O<sub>2</sub> nos gases de escape ( Figura 6.6 e Figura 6.7), deverá resultar principalmente do avanço à injeção (injeção mais rápida e antecipada de combustível na câmara de combustão dos cilindros do motor), o qual se verifica geralmente quando os motores estão equipados com bombas de injeção mecânicas em linha (como é o caso do motor utilizado) (Lapuerta *et al.*, 2008; Monyem & Van Gerpen, 2001). O avanço à injeção resultará do aumento de pressão na injeção como consequência da maior densidade e incompressibilidade do biocombustível e da maior viscosidade, o que reduzirá as perdas na bomba, conduzindo a temperaturas mais elevadas e a maiores taxas de formação de NO resultantes do maior tempo de residência na câmara de combustão e do maior teor de oxigénio na composição da mistura (Lapuerta *et al.*, 2008; Di *et al.*, 2009).

O B30.1 apresentou uma redução nas emissões comparativamente ao B15.1, em cerca de 3%, apesar de ter um maior teor em oxigénio, o que poderá indicar que o menor índice de cetano do B30.1 terá influenciado mais a formação de NO através da diminuição do avanço da combustão resultante dos maiores atrasos na inflamação (Monyem & Van Gerpen, 2001), do que o avanço da injeção (resultante do aumento da densidade e viscosidade inerente ao B30.1). Considerando a diminuição da emissão específica de NO<sub>x</sub> verificada em B30.1 face a B15.1 não parece que o maior teor de oxigénio em B30.1 tenha sido determinante na formação de NO. A observação de que o teor de oxigénio não seja determinante na formação de NO foi referida anteriormente por: i) Lapuerta *et al.*(2002) utilizou misturas de 25% e 100% de biocombustível de

primeira geração em gasóleo, num motor Renault (modelo F8Q) a velocidades compreendias entre 2 087 rpm e 3 175 rpm, tendo verificado que a presença de oxigénio na composição do biocombustível não foi a causa do aumento das emissões específicas de NO<sub>x</sub>, uma vez que a razão estequiométrica combustível:oxigénio, contabilizando o oxigénio na composição do biocombustível de primeira geração, do gasóleo manteve-se inferior às restantes misturas utilizadas. Verificou que a uma pressão média efectiva superior a 0,4 MPa as emissões específicas de NO<sub>x</sub> de biocombustível de primeira geração (proveniente de óleo de girassol) foram inferiores às do gasóleo; ii) Canacki (2005) indicou que o aumento das emissões de NO<sub>x</sub> poderá dever-se ao avanço à injeção e não ao teor de oxigénio no biocombustível de primeira geração.

As misturas B15.2 e B30.2 apresentaram emissões específicas de NO<sub>x</sub> superiores ao B0, de 16% e 6%, respectivamente, mas inferiores às misturas na mesma proporção com incorporação de biocombustível de primeira geração, apresentando similarmente a estas uma redução entre B15.2 e B30.2, valores de temperatura superiores ao B0 e teor de O<sub>2</sub> nos gases de escape inferiores ao B0.

A menor emissão de B15.2 e B30.2 resultará da inexistência de oxigénio na sua composição, o que não promoverá a formação de NO. Desta forma o aumento da emissão específica de NO<sub>x</sub> de B15.2 e B30.2 comparativamente ao B0, considerando que na composição elementar das misturas o teor de N era inferior a 0,02% (m/m), poderá ter resultado principalmente da conversão do azoto atmosférico existente na câmara de combustão, de acordo com o mecanismo de Zeldovich. A redução da emissão de NO<sub>x</sub> de B30.2 comparativamente a B15.2, cerca de 9%, poderá dever-se a um maior rendimento durante a combustão, em especial na combustão por difusão, resultante da maior razão H:C. As temperaturas médias dos gases de escape de B15.2 e B30.2 foram as mais elevadas, nomeadamente  $438,74 \pm 1,18$  °C e  $442,34 \pm 2,57$  °C<sup>25</sup> apresentando diferenças significativas (p= 95%), a que correspondeu o mesmo teor médio de O<sub>2</sub> nos gases de escape,  $9,98 \pm 0,03$  % e  $9,98 \pm 0,08$ %.

---

<sup>25</sup> Desvio padrão

## 6.4 Emissão de partículas totais em suspensão

A emissão de Partículas Totais em Suspensão (PTS) ao longo das três condições de ensaio apresentou uma tendência inversa à emissão de NO<sub>x</sub> ( Figura 6.8). Os maiores valores de emissão de PTS foram registados na condição de ensaio II, ou seja, a uma potência de 5 kW .

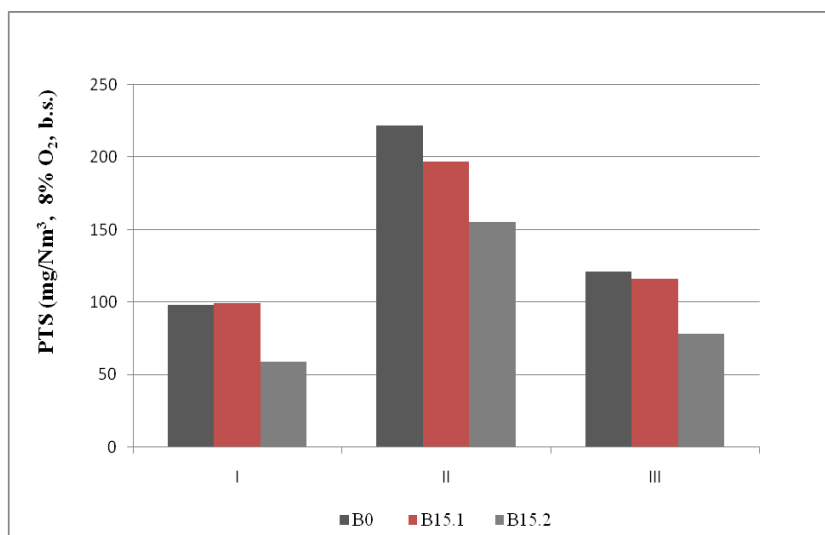
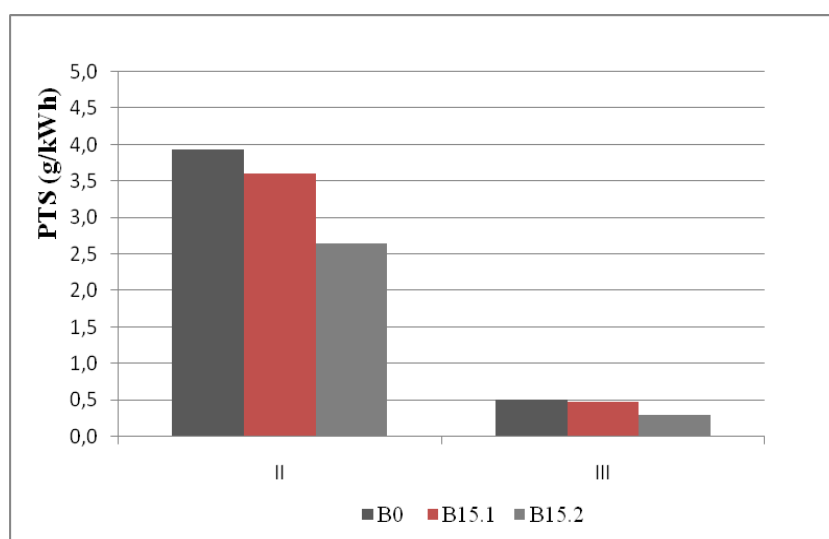


Figura 6.8 - Emissão de PTS (mg/Nm<sup>3</sup>) corrigidas para um teor de 8% de O<sub>2</sub> e base seca

Analisando as emissões específicas de PTS verificou-se uma diminuição quando o motor funcionou a potências médias (20 kW), comparativamente a potências baixas (5 kW) (Figura 6.9). A menor emissão específica de PTS, quando se utiliza biocombustível de primeira geração, segue os resultados apresentados anteriormente por: i) Lapuerta *et al.* (2002) que verificou uma diminuição da emissão específica de PTS aquando da utilização de misturas de 25% e 100% de biocombustível de primeira geração em gasóleo, comparativamente à utilização de gasóleo. Ocorreu uma diminuição das emissões específicas de PTS quando o motor passou de um funcionamento a baixa pme (0,1 MPa), para média pme (0,4 MPa), tendo-se verificado uma maior redução das emissões específicas de PTS das misturas de biocombustível, comparativamente ao gasóleo, à pme de 0,1 MPa; ii) Canakci and Van Gerpen (2001) utilizaram misturas de 20% e 100% de biocombustível de primeira geração em gasóleo, num motor de 57 kW, tendo verificado uma redução de até 65% das emissões de PTS, comparativamente à utilização de gasóleo.



**Figura 6.9 - Emissões específicas de PTS (g/kWh) para as condições de ensaio II e III**

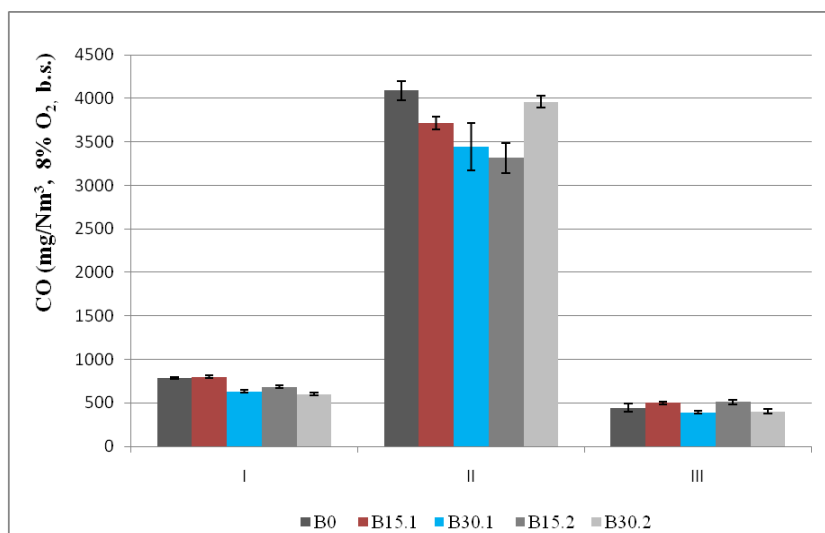
Nas condições de ensaio III, o B15.1 e B15.2 apresentaram uma redução das emissões específicas de PTS de cerca de 5% e 42%, respectivamente, quando comparado com o B0. A mistura B15.2 apresentou uma redução da emissão específica de PTS, comparativamente ao B15.1, em cerca de 39%. A redução das emissões de B15.1 pode ser explicada pelo maior teor em oxigénio na mistura, que associado ao avanço na injeção originará maiores taxas de oxidação das PTS, devido ao maior tempo de residência destas em zonas de temperaturas elevadas durante a combustão explosiva e progressiva (Schmidt & Van Gerpen, 1996; Chang & Van Gerpen, 1997; Rakopoulos *et al.*, 2008). O aumento da potência aparenta estar associado a um aumento da combustão por difusão, sendo que neste caso o maior teor em oxigénio de B15.1 permitirá um aumento do rendimento nesta fase, contribuindo para uma maior oxidação das PTS (Durbin & Norbeck, 2002; Leung *et al.*, 2006).

No que respeita ao B15.2, a razão aparente para a menor emissão específica de PTS à potência média, comparativamente ao B0, terá sido a sua menor viscosidade cinemática que permitirá uma atomização mais eficiente, o que associado a um menor atraso na inflamação (resultante de um maior índice de cetano) terá permitido um incremento da oxidação das PTS durante a combustão explosiva, devido ao aumento de área superficial de combustível exposto a elevadas temperaturas durante um maior

período de tempo. A maior razão H:C, de B15.2, terá permitido um maior rendimento durante a explosão por difusão, contribuindo para a redução das PTS nesta fase da combustão.

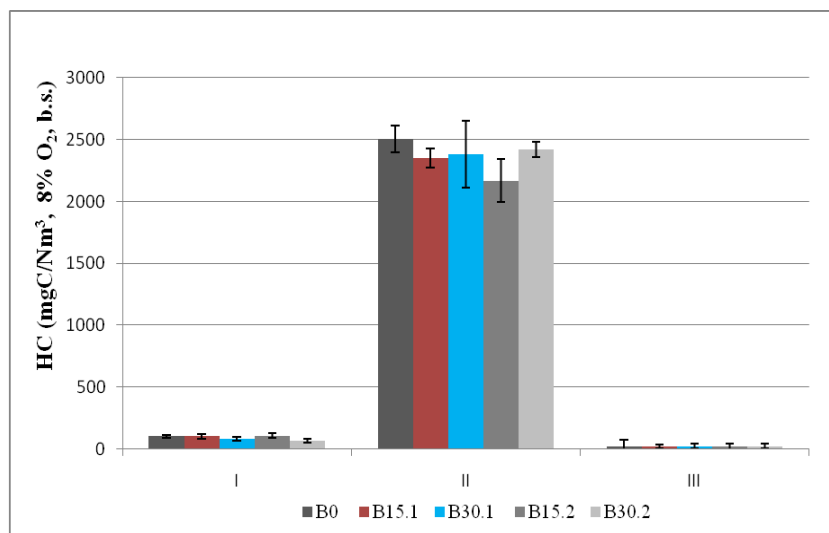
## 6.5 Emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos

As emissões de CO e HC, apresentaram a mesma tendência das emissões referentes às PTS nas três condições de ensaios (I, II e III): valores elevados para potências baixas (5 kW) e valores reduzidos em “ponto morto” e em potências médias (20 kW) ( Figura 6.10 e Figura 6.11).



**Figura 6.10 - Emissões médias de CO (mg/Nm<sup>3</sup>) corrigidas para um teor de 8% de O<sub>2</sub> e base seca (as barras a preto indicam o desvio padrão)**

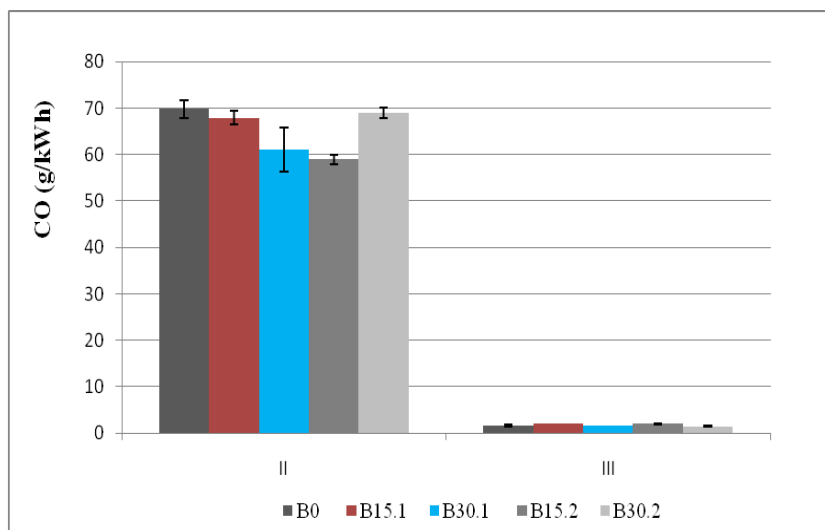




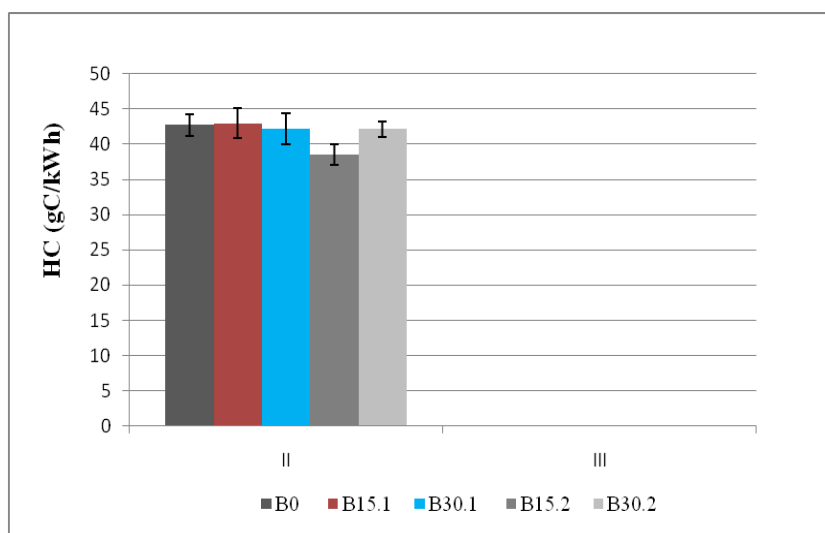
**Figura 6.11 - Emissões médias de HC (mgC/Nm<sup>3</sup>) corrigidas para um teor de 8% de O<sub>2</sub> e base seca (as barras a preto indicam o desvio padrão)**

A redução dos valores de emissão de CO, entre potências baixas e potências médias segue os resultados apresentados por Koçak *et al.* (2007). Este autor observou uma diminuição acentuada das emissões de CO entre as 1 750 rpm e as 3 500 rpm de funcionamento do motor, verificando que os 3 biocombustíveis utilizados (sem incorporação de gasóleo) apresentaram uma diminuição de 17% a 19%, em média, nas emissões de CO, comparativamente ao gasóleo.

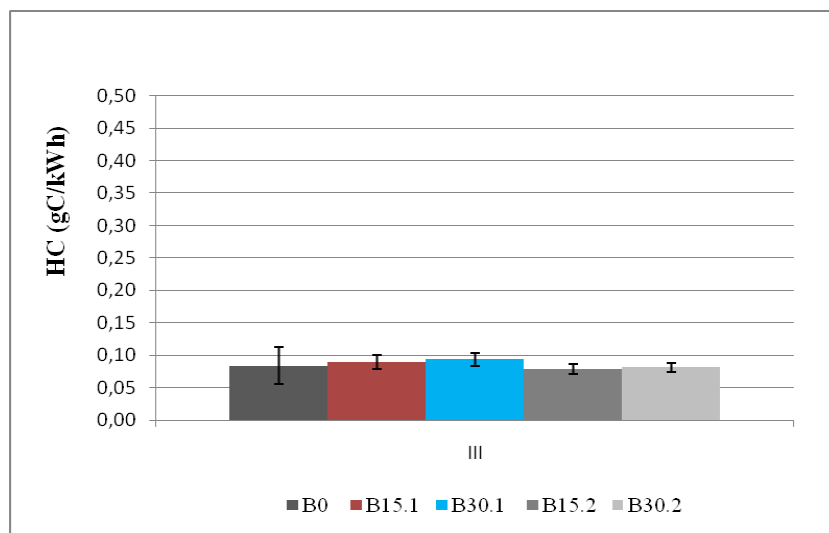
As emissões específicas de CO e HC seguiram a mesma tendência ( Figura 6.12, Figura 6.13 e Figura 6.14), indicando que as elevadas temperaturas de combustão que foram registadas à potência média (condição de ensaio III) promoveram uma combustão mais completa das misturas utilizadas. Verifica-se uma diminuição das emissões específicas de CO e HC à potência média (20 kW), o que corresponde à condição de funcionamento do motor (condição III) na qual se verificou o maior rendimento do motor. Esta tendência foi apresentada por: Di *et al.* (2009) e Utlu & Koçak (2008) que observaram uma diminuição das emissões de CO à medida que a pressão média de funcionamento e o rendimento do motor aumentava.



**Figura 6.12 - Emissões específicas médias de CO (g/kWh) para as condições de ensaio II e III (as barras a preto indicam o desvio padrão)**



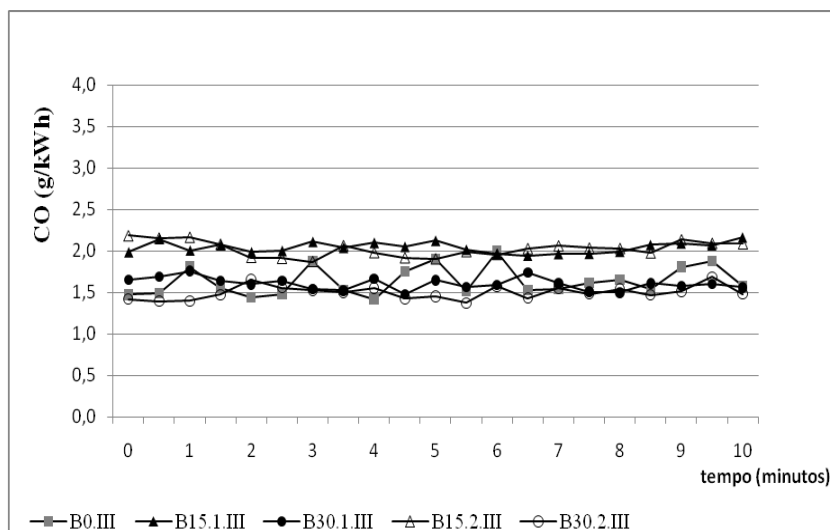
**Figura 6.13 - Emissões específicas médias de HC (gC/kWh) para as condições de ensaio II e III (as barras a preto indicam o desvio padrão)**



**Figura 6.14 - Emissões específicas médias de HC (gC/kWh) para a condição de ensaio III (as barras a preto indicam o desvio padrão)**

### 6.5.1 CO

Na condição de ensaio III, correspondente à potência média, as misturas B15.1, B15.2 e B30.2 apresentaram diferenças significativas comparativamente ao B0 ( $p=95\%$ ). No que concerne a B15.1 e B15.2, estas apresentaram um aumento de cerca de 25% e 24%, respectivamente, enquanto com B30.2 observou-se uma diminuição de cerca de 8%, comparativamente ao B0. Na Figura 6.15 é apresentada a variação da emissão específica de CO para as diferentes misturas, verificando-se que as misturas não apresentaram elevadas variações e que B15.1 e B15.2 registaram os valores mais elevados ao longo do período de amostragem.



**Figura 6.15 - Variação da emissão de CO (g/kWh) ao longo do período de amostragem (condição de ensaio III)**

A diminuição da emissão de CO entre B15.1 e B30.1 e entre B15.2 e B30.2 é um bom indicador do aumento da qualidade da combustão, resultante da maior incorporação de biocombustível de primeira e segunda geração no gasóleo de origem fóssil. Alguns autores indicam uma diminuição da emissão de CO aquando da utilização de misturas com incorporação de biocombustível de primeira geração (Lapuerta *et al.*, 2008; Di *et al.*, 2009), embora esta redução possa depender da potência a que é realizado o ensaio de combustão. A baixa potência, o gasóleo de origem fóssil apresentaria maiores emissões, a média potência estas seriam equivalentes ou menores do que as das misturas com biocombustível e a potências elevadas o gasóleo de origem fóssil apresentaria as maiores emissões (Murillo *et al.*, 2007; Dorado *et al.*, 2003). Neste âmbito, será útil realizar ensaios à potência mais elevada de forma a verificar esta tendência.

A redução observada entre B15.1 e B30.1, pode ser explicada pelo maior teor em oxigénio na mistura B30.1, o que permitirá uma combustão mais completa (Rakopoulos *et al.*, 2004). A redução observada entre B15.2 e B30.2 poderá advir da combustão mais completa, resultante da maior razão H:C e do maior índice de cetano destas misturas, que contribuirão para a menor formação de zonas ricas em combustível na câmara de combustão.

### 6.5.2 HC

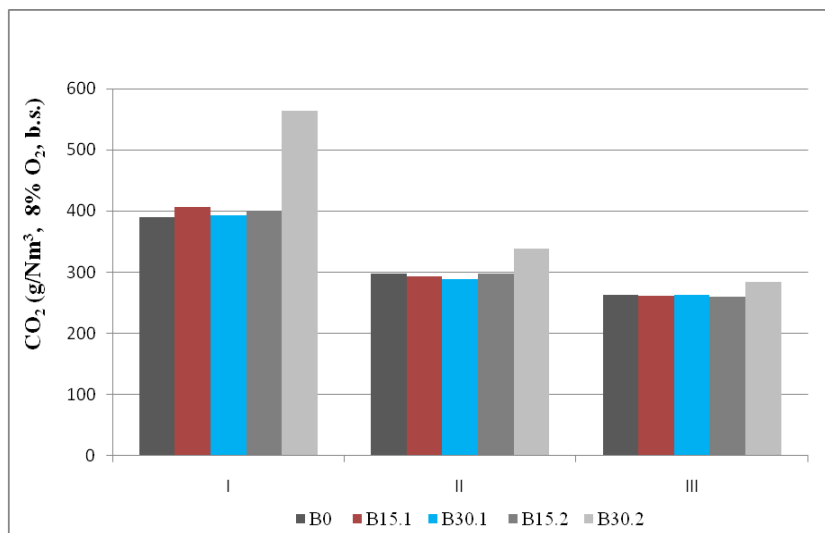
No que se refere à emissão específica de HC, as misturas B15.1, , B15.2 e B30.2, nas condições de ensaio III, não apresentaram diferenças significativas ( $p=95\%$ ), quando comparados com o B0. Verificou-se uma redução em cerca de 13% e 17% da emissão específica de HC resultante da utilização de B15.2, quando comparado com B15.1 e B30.1, respectivamente.

Seria expectável que as misturas B15.2 e B30.2 apresentassem uma menor emissão de HC comparativamente ao B0, resultante da sua menor viscosidade cinemática e maior índice de cetano, o que não se verificou.

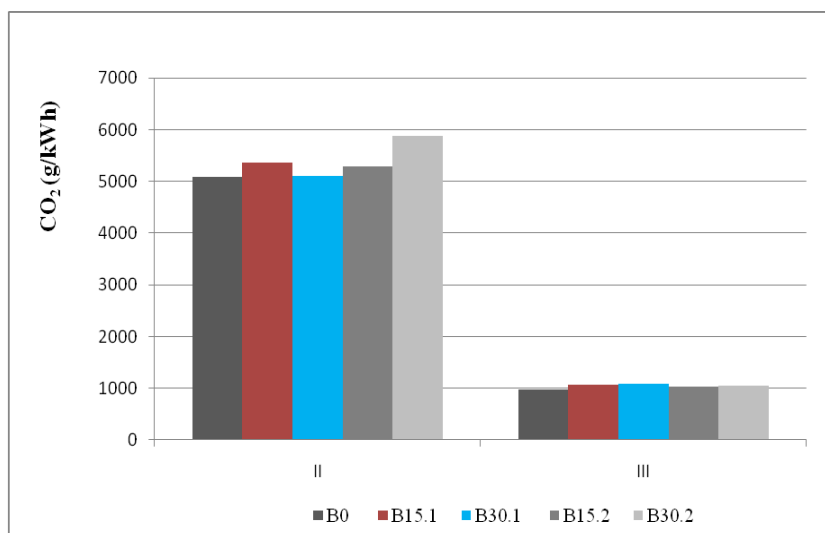
Neste âmbito, enquanto alguns autores referem uma diminuição das emissões de HC aquando da utilização de biocombustível de primeira geração, em misturas ou puro (Di *et al.*, 2009; Murillo *et al.*, 2007), existem outros que indicam a existência de diferenças não significativas entre a sua utilização e a utilização de gasóleo de origem fóssil (Labeckas & Slavinskas, 2006; Turrio-Baldassarri *et al.*, 2004).

## 6.6 Emissão de dióxido de carbono

A emissão de CO<sub>2</sub> diminuiu ao longo das condições de ensaio (Figura 6.16), sendo que, de forma semelhante aos restantes gases de escape analisados, as emissões específicas de CO<sub>2</sub> foram menores na condição de ensaio III. A condição de ensaio II correspondeu à potência média de funcionamento do motor (20 kW), sendo a condição de ensaio que mais se aproximou do rendimento óptimo do motor.



**Figura 6.16 - Emissões médias de CO<sub>2</sub> (mg/Nm<sup>3</sup>) corrigidas para um teor de 8% de O<sub>2</sub> e base seca.**



**Figura 6.17 - Emissões específicas médias de CO<sub>2</sub> (g/kWh) para as condições de ensaio II e III.**

O gasóleo de origem fóssil, B0, apresentou uma menor emissão específica de CO<sub>2</sub>, sendo que B15.1 e B30.1 apresentaram um aumento de cerca de 9% e 12% e B15.2 e B30.2 um aumento de cerca de 6% e 9%. As maiores emissões de CO<sub>2</sub> das misturas, comparativamente ao B0, aparentemente estarão associadas à melhor combustão resultante do teor em oxigénio e avanço na injeção (B15.1 e B30.1) e da maior razão H:C e índice de cetano (B15.2 e B30.2). As misturas B30.1 e B30.2 apresentaram as maiores emissões de CO<sub>2</sub>, o que é concordante com as menores emissões de CO e maior rendimento do motor apresentado por estas misturas. Uma vez que as emissões específicas de CO<sub>2</sub> foram calculadas com base no caudal de combustível que entrou no

sistema e no teor de carbono na composição das misturas, será útil proceder à medição deste gás em ensaios futuros, permitindo desta forma verificar com mais exactidão e precisão a variância e a relação com outros parâmetros.

Página Propositadamente Deixada em Branco



## 7 CONCLUSÕES

Através dos ensaios realizados verificou-se um incremento significativo no rendimento do motor quando se passou de uma potência baixa (cerca de 5 kW) para uma potência média (cerca de 20 kW) de funcionamento do motor, ao qual esteve associada uma diminuição do consumo específico e emissões específicas dos gases de escape (NO<sub>x</sub>, CO, HC e CO<sub>2</sub>) e PTS das diferentes misturas estudadas e gasóleo de origem fóssil.

À potência média, a mistura B30.2 apresentou melhores resultados, nomeadamente: i) uma maior rendimento do motor (32,9%) quando comparada com B15.1, B30.1 e B15.2 e semelhante ao B0; ii) um menor consumo específico que B15.1, B30.1 e B15.2 (em cerca de 12%, 13% e 10%, respectivamente) não apresentando diferenças significativas comparativamente ao gasóleo de origem fóssil; iii) um menor aumento da emissão específica de NO<sub>x</sub> (6%); iv) e uma maior redução da emissão específica de CO (8%) comparativamente ao gasóleo de origem fóssil, não apresentando diferenças significativas na emissão específica de HC comparativamente a este e às restantes misturas.

No que concerne às emissões específicas de PTS, as misturas B15.1 e B15.2 apresentaram uma redução de cerca de 5% e 42% comparativamente ao gasóleo de origem fóssil.

As misturas de biocombustível de primeira e segunda geração apresentaram maiores emissões específicas de CO<sub>2</sub>, quando comparadas com o gasóleo de origem fóssil, o que aparenta estar relacionado com a combustão mais completa apresentada por estas misturas.

Aparentemente, os melhores resultados apresentados pelo B30.2 podem ser associados à sua razão H:C, maior índice de cetano, inexistência de oxigénio na sua composição e menor viscosidade cinemática que contribuem para um consumo semelhante ao gasóleo de origem fóssil e para uma combustão mais completa (resultante de uma atomização mais eficiente, redução da formação de zonas ricas em combustível na câmara de combustão e maior rendimento durante a combustão por difusão) e,

consequentemente, menor emissão de poluentes atmosféricos comparativamente ao gasóleo de origem fóssil e restantes misturas de primeira e segunda geração.

A mistura B30.1 apresentou melhores resultados que B15.1, à potência média (cerca de 20 kW), ao nível do rendimento do motor (31%) e das emissões específicas de NO<sub>x</sub> (um aumento de cerca de 15%) e CO (sem diferenças significativas) comparativamente ao gasóleo de origem fóssil.

Os resultados obtidos com as misturas de biocombustíveis de primeira geração aparentam estar relacionados com o seu teor em oxigénio, densidade, viscosidade e índice de cetano. Um maior teor em oxigénio contribuirá para uma combustão mais completa e menor emissão de CO, mas também para um maior consumo específico. O aumento do teor em oxigénio e o avanço da injeção, resultante da maior densidade e viscosidade, potenciarão uma redução da emissão das PTS. A formação de NO<sub>x</sub> parece ter sido mais influenciada pelo avanço à injeção e índice de cetano do que pelo teor em oxigénio.

As misturas com incorporação de biocombustível de segunda geração (B15.2 e B30.2) apresentaram melhores resultados, à potência média e nas mesmas proporções, comparativamente às misturas com biocombustível de primeira geração (B15.1 e B30.1). Estas melhorias incluem um maior rendimento do motor, um menor consumo específico (comparação B30.2 com B15.1 e B30.1), uma menor emissão específica de NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HC (comparação B15.2 com B15.1 e B30.1) e de PTS (comparação de B15.2 com B15.1).

## 8 TRABALHO FUTURO

O presente estudo foi realizado a potências baixas (5 kW) e médias (20 kW), comparativamente à potência máxima do motor de combustão interna por compressão utilizado, usando duas misturas volumétricas (B15 e B30) de cada tipo de biocombustível disponível. Deverão ser repetidos os ensaios realizados no presente trabalho, para que os resultados apresentados sejam validados

Torna-se necessário proceder ao estudo das emissões específicas de NO<sub>x</sub>, CO, HC, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e PTS (incluindo a sua análise granulométrica), em toda a gama de potência do motor, resultantes da: i) utilização da mistura volumétrica B20, de forma a analisar a evolução entre as misturas B15 e B30; ii) utilização de misturas com maior incorporação de biocombustível no gasóleo de origem fóssil; iii) utilização de biocombustível puro.

Ao nível da instalação experimental deverá ser: i) estudada a influência da proximidade do tubo de escape na temperatura de entrada do ar no motor e consequentemente a sua influência no rendimento do motor e nas emissões de poluentes atmosféricos (NO<sub>x</sub>, CO, HC e PTS) e CO<sub>2</sub>; ii) realizada a medição da temperatura no interior da câmara de combustão do cilindro, permitindo adquirir dados que contribuirão para uma melhor compreensão sobre a formação dos poluentes atmosféricos durante a combustão do gasóleo e das misturas volumétricas de biocombustível de primeira e segunda geração; iii) integrada a medição da velocidade do motor, consumo de combustível, binário, temperatura (entrada de ar no motor, câmara de combustão do cilindro, gases de escape e cabeça do motor) e emissão de HC numa interface informática, permitindo uma aquisição mais eficaz dos dados; iv) analisada uma nova abordagem metodológica que permita otimizar a amostragem de PTS, nomeadamente a implementação de outros sistemas de diluição parcial e diluição total do fluxo dos gases de escape.

Página Propositadamente Deixada em Branco

## 9 BIBLIOGRAFIA

Albert, L., 1988. “Curso Basico de Toxicologia Ambiental”. Centro Panamericano de Ecologia Humana y Salud, Organizacion Panamericana de la Salud, Organizacion Mundial de la Salud, Limusa;

Alonso, M., Finn, E., 1999. “Física”. Addison Wesley Longman;

APA, 2009. Agência Portuguesa do Ambiente. “Inventário Nacional de GEE: CFR – Common Reporting Format”. (<http://www2.apambiente.pt>, Maio 2009);

Applied Catalysis A, 2004. “Editorial: Present and future applications of the Fischer-Tropsch process”. General 276: pp. 1 – 3;

Barenbrug, A., 1974. Psychometry and Psychometric Charts. 3<sup>rd</sup> edition. Camber of Mines of South Africa;

Boucher, O., Myhre, G., Myhre, A., 2004. “Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate”. Clim. Dyn. 22: pp. 597 – 604;

Campos, L., 2002. “Nomenclatura dos compostos orgânicos 2<sup>a</sup> edição”. Escolar Editora;

Canakci M., Van Gerpen J., 2001. “Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel, and soybean oil biodiesel”. ASAE Annual international meeting 2001; 016050;

Canakci M., 2005. “Performance and emissions characteristics of biodiesel from soybean oil”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering; D7: pp. 915 – 922;

Cao, P., Dubé, M., Tremblay, A., 2008. “Methanol recycling in the production of biodiesel in a membrane reactor”. Fuel 87: pp. 825 – 833;

CE, 2001. Comissão Europeia. “White Paper: European transport policy 2010: Time to decide”. Comissão das Comunidades Europeias. (<http://ec.europa.eu>, Maio 2008);

CE, 2005. Comissão Europeia. “Thematic Strategy on air pollution”. COM(2005)446. Comissão das Comunidades Europeias. (<http://ec.europa.eu>, Maio 2008);

CE, 2006. Comissão Europeia. “Keep Europe moving – Sustainable mobility for our continent – MTR of the European Commission’s 2001 transport White Paper”. COM(2006)314. Comissão das Comunidades Europeias. (<http://ec.europa.eu>, Maio 2008);

CE, 2008. Comissão Europeia. “Duas vezes 20 até 2020: As alterações climáticas, uma oportunidade para a Europa”. COM(2008)30. Comissão das Comunidades Europeias. (<http://ec.europa.eu>, Maio 2008);

Chalen, B., Baranescu, R., 1999. “Diesel Engine Reference Book”. 2ª edição Butterworth Heinemann;

Chang, R., 1994. “Química”. MacGraw-Hill, 5ª Edição;

Chang, D., Van Gerpen J., 1997. “Fuel properties and engine performance for biodiesel prepared from modified feedstocks”. SAE paper, 971684;

Chavanne, G., 1938. “Procédé de Transformation d’Huilies Végétales en Vue de Leur Utilisation comme Carburants”. Belgium Patent 422,877 (August 31, 1937); Chem. Abstr. 32: 4313;

Chomiak, J., 1990. Combustion. “A Study in Theory, Fact and Application”. Gordon and Breach Science Publishers;

Coelho, P., Costa, M., 2007. “Combustão”. Edições Orion;

Conselho Europeu, 1998. “Directiva 98/69/CE do Parlamento Europeu e do Conselho-relativa às medidas a tomar contra a poluição do ar pelas emissões provenientes dos veículos a motor e que altera a Directiva 70/220/CEE do Conselho”. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L350: pp. 1 - 57 ([http://europa.eu.int/comm/environment/index\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/environment/index_en.htm), Maio 2008);

Conselho Europeu, 2003. “Directive 2003/30/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL – On the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport”. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L123:pp. 42 - 46, ([http://europa.eu.int/comm/environment/index\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/environment/index_en.htm), Maio 2008);

Conselho Europeu, 2005. “Directive 2005/55/CE do Parlamento Europeu e do Conselho - relativa à aproximação das legislações dos Estados-Membros respeitantes às medidas a tomar contra a emissão de gases e partículas poluentes provenientes dos motores de ignição por compressão utilizados em veículos e a emissão de gases poluentes provenientes dos motores de ignição comandada alimentados a gás natural ou a gás de petróleo liquefeito utilizados em veículos”. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L275: pp. 1 – 163

([http://europa.eu.int/comm/environment/index\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/environment/index_en.htm), Maio 2008);

Conselho Europeu, 2007. “Regulamento (CE) n.º 715/2007 do Parlamento Europeu e do Conselho – relativo à homologação dos veículos a motor no que respeita às emissões dos veículos ligeiros de passageiros e comerciais (Euro 5 e Euro 6) e ao acesso à informação relativa à reparação e manutenção de veículos”. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L171: pp. 1 – 16

([http://europa.eu.int/comm/environment/index\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/environment/index_en.htm), Maio 2008);

Crutzen, P., 1994. “Global Tropospheric Chemistry”. NATO ASI Series, Vol. I, 21, Low Temperature Chemistry of the Atmosphere. Springer-Verlag Berlin Heidelberg;

Crutzen, P., Mosier, A., Smith, K., Winiwarter, W., 2007. “N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels”. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 7, pp. 11191-11205 (<http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/7/11191/2007/>, Julho 2008);

Curt, M, Fernández, J, 2004. “Low-cost Biodiesel from Cynara Oil”. 2<sup>nd</sup> World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection Proceedings, pp. 109 - 112; 10 – 14 May, Rome, Italy;

DGEG, 2008, Direcção-Geral de Energia e Geologia. “Estatísticas- Petróleos e derivados”. (<http://www.dgge.pt/>, Maio 2008);

Di, Y., Cheung, C., Huang, Z., 2009. “Comparison of the effect of biodiesel-diesel and ethanol-diesel on the gaseous emission of a direct-injection diesel engine”. Atmospheric Environment, 43: pp.2721 - 2730;

Diesel, R., 1912. “The Diesel Oil-Engine”. Engineering 93: pp. 395 - 406; Chem. Abstr. 6: 1984;

Diesel, R., 1913. “The Diesel Oil-Engine and Its Industrial Importance particularly for Great Britain”. Proc. Inst. Mech. Eng., pp. 179-280; Chem. Abstr. 7: 1605;

Dorado, M., Ballesteros, E., Arnal, J., Gomez, J., Lopez, F., 2003. “Emissions from a diesel engine fueled with transesterified waste olive oil”. Fuel 82: pp. 1311 – 1315;

DR, 2000. Diário da República – I Série- A, n.º 105, 6 de Maio de 2000. Decreto-Lei n.º 72/2000, de 6 de Maio, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, E.P., Lisboa, pp. 1856 – 1900 (<http://www.dre.pt/>, Maio 2008);

DRa, 2000. Diário da República – I Série- A, n.º 202, 1 de Setembro de 2000. Decreto-Lei n.º 202/2000, de 1 de Setembro, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, E.P., Lisboa, pp. 4490 – 4598 (<http://www.dre.pt/>, Maio 2008);

DR, 2006. Diário da República – I Série, n.º 172, 6 de Setembro de 2006. Decreto-Lei n.º 181/2006, de 6 de Setembro, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, E.P., Lisboa, pp. 6578 – 6583 (<http://www.dre.pt/>, Maio 2008);

DRa, 2006. Diário da República – I Série, n.º 25, 21 de Março de 2006. Decreto-Lei n.º 62/2006, de 21 de Março, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, E.P., Lisboa, pp. 2050 – 2053 (<http://www.dre.pt/>, Maio 2008);

DR, 2007. Diário da República – I Série, n.º 200, 17 de Outubro de 2007. Decreto-Lei n.º 346/2007, de 17 de Outubro, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, E.P., Lisboa, pp. 7912 – 7916 (<http://www.dre.pt/>, Maio 2008);

DR, 2008. Diário da República – I Série, n.º 104, 30 de Maio de 2008. Decreto-Lei n.º 89/2008, de 30 de Maio, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, E.P., Lisboa, pp. 3072 – 3080 (<http://www.dre.pt/>, Setembro 2009);

DRa, 2008. Diário da República – I Série – A , n.º 40, 5 de Fevereiro de 2008. Resolução do Conselho de Ministros n.º 21/2008, de 5 de Fevereiro, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, E.P., Lisboa, pp. 907 – 909 (<http://www.dre.pt/>, Maio 2008);



DR, 2009. Diário da República – I Série, n.º 57, 26 de Fevereiro de 2009. Decreto-Lei n.º 49/2009, de 26 de Fevereiro, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, E.P., Lisboa, pp. 1350 – 1354 (<http://www.dre.pt/>, Março 2009);

Drewnick, F., 2004. “Airborne Nanoparticles – properties, measurement and atmospheric relevance”. Wintersemester 2004/2005, Max Planck Institute für Chemie / Institute für Physik der Atmosphäre, Uni Mainz;

Durbin, T., Norbeck, J., 2002. “Effects of biodiesel blends and arco ECdiesel on emissions from light heavy-duty diesel vehicles”. Environment and Science Technology 36: pp. 1686 – 1691;

Dwivedi, D., Agarwal, A., Sharma, M., 2006. “Particulate emission characterization of a biodiesel vs diesel-fuelled compression ignition transport engine: A comparative study”. Atmospheric Environment 40: pp. 5586 – 5595;

EEAa, 2008. European Environment Agency. “Climate for a Transport Change, TERM 2007: indicators tracking transport and environment in the European Union”, Copenhagen 2008, ([http://www.eea.eu.int/main\\_html](http://www.eea.eu.int/main_html), Maio 2008);

EEAb, 2008. European Environment Agency. “EEA air pollutant emissions data viewer (LRTAP Convention)”. ([http://www.eea.eu.int/main\\_html](http://www.eea.eu.int/main_html), Maio 2008);

EEAa, 2009. European Environment Agency. “Transport at a crossroads, TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union”, Copenhagen 2008, ([http://www.eea.eu.int/main\\_html](http://www.eea.eu.int/main_html), Maio 2009);

EEAb, 2009. European Environment Agency. “EEA air pollutant emissions data viewer (LRTAP Convention)”. ([http://www.eea.eu.int/main\\_html](http://www.eea.eu.int/main_html), Maio 2009);

EEAc, 2008. European Environment Agency. “EEA greenhouse gas data viewer”. ([http://www.eea.eu.int/main\\_html](http://www.eea.eu.int/main_html), Junho 2008);

EEAd, 2007. European Environment Agency. “Estimating the environmentally compatible bioenergy potential from agriculture”. EEA Technical report n.º 12/2007, ([http://www.eea.eu.int/main\\_html](http://www.eea.eu.int/main_html) , Julho 2008);

EUCAR, CONCAWE, JRC, 2004. “Well-To-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context”; (<http://ies.jrc.ec.europa.eu/wtw.html> , Julho 2008)

Finlayson-Pitts & Pitts Jr, B., Pitts Jr, J., 1997. “Tropospheric Air Pollution: Ozone, Airborne Toxics, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and Particles”. Science276: pp. 1045 – 1051;

Flores-Luque, V., Galán, H., Gómez, C., 1987. “Estudio de indicadores físico-químicos en mezclas binarias e ternarias de etanol 96°Com derivados grasos e diesel mineral, para su empleo como combustible en maquinaria agrícola”. Oléagineux; 42: pp. 475 - 481;

Gartner, S., Idrissova, F., Reinhardt, G., 2004. “Biodiesel in the future: which options are best?”. 2<sup>nd</sup> World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection Proceedings, pp. 2198 - 2201; 10 – 14 May, Rome, Italy;

Graboski, M., Ross, J., MacCormick R., 1996. “Transient emissions from no. 2 diesel and biodiesel blends in a DDC series 60 engine”. SAE paper, 961166;

Graboski, M., McCormick, R., 1998. “Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines”. Progress in Energy and Combustion Science24:pp. 125-64;

Gulyurtlu, I., 2007. “Módulo 2.5 – Biomass energy conversion technologies (thermal): Gasification”. International Master in Environment and Energy. Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa;

Hansen K., Jensen, M., 1997. “Chemical and biological characteristics of exhaust emissions from a D*ci* diesel engine fuelled with rapeseed oil methyl ester (MRE)”.SAE paper, 971689;

Hernando, J., Leton, P., Matia, M. P., Novella, J. L., Alvarez-Builla, J., 2007. “Biodiesel and FAME synthesis assisted by microwaves: Homogeneous batch and flow processes”. Fuel 86: , pp. 1641 – 1644;

Hester, R. E.; Harrison, R., 1995. “Volatile organic compounds in the atmosphere”. The Royal Society of Chemistry: London;

IPCC, 2005, Intergovernmental Panel on Climate Change. “Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues related to hydrofluorocarbons and perfluorocarbons”. Cambridge University Press, (<http://www.ipcc.ch/>, Maio 2008);

IPCC, 2007, Intergovernmental Panel on Climate Change. “Climate Change 2007: The Physical Science Basis”. Cambridge University Press, (<http://www.ipcc.ch/>, Maio 2008);

IPQ, 2005, Instituto Português da Qualidade. “NP EN 590:2005 – Combustíveis para automóveis. Gasóleo. Especificações e métodos de ensaio”;

ISO, 1992, International Organization for Standardization. “ISO 1585: Road Vehicles – Engine test code - Net Power”. Third edition;

Jungmeier, G., Konighofer, K., Varela, M., Lago, C., Kristensen, N., Dallmutzen, J., Odgard, T., Karaoglanoglou, L., Koukios, E., Lange, T., Swets, A., Heuvel, E., Host, S., Poitrait, E., Rathbauer, J., Bolter, I., Mabee, W., Saddler, J., Segeborg-Fick, A., 2004. “Environmental and economic performance of transportation biofuels in Europe”. 2<sup>nd</sup> World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection Proceedings, pp. 1863 - 1866; 10 – 14 May, Rome, Italy;

Kalnes, T., Marker, T., Shonnard, D., 2007. “Green Diesel: a second generation biofuels”. International Journal of Reactor Engineering, Volume 5, article A48. The Berkeley Electronic Press;

Kalnes, T., Marker, T., Shonnard, D., Koers, K., 2008. “Life cycle assessment for Green Diesel production”. UOP – A Honeywell Company. The World Congress on Industrial Biotechnology & Bioprocessing. April 27 – 30, Chicago, Illinois. ([http://www.bio.org/ind/wc/08/breakout\\_pdfs/20080430/Track1\\_ContinentalA/Session\\_8\\_1045am1215pm/Kalnes\\_Continental\\_A\\_Wed.pdf](http://www.bio.org/ind/wc/08/breakout_pdfs/20080430/Track1_ContinentalA/Session_8_1045am1215pm/Kalnes_Continental_A_Wed.pdf), 20 Março 2009);

Knothe, G., Matheaus, A., Ryan, T., 2003. “Cetane numbers of branched and straight-chain fatty esters determined in an ignition quality tester”. Fuel82: pp. 971-975;

Knothe, G., Clements, D., Van Gerpen, J., Shanks, B., Pruszko, R., 2004. “Biodiesel Production Technology”. NREL – National Renewable Energy Laboratory, (<http://www.nrel.gov>, Maio 2008);

Knothe, G., 2005. “Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters”. *Fuel Process Technology* 86: pp. 1059 - 1070;

Knothe, G., Gerpen, J., Krah, J., 2005. “The Biodiesel Handbook”. AOCS Press, Champaign, Illinois;

Koçak, M., Ileri, E., Utlu, Z., 2007. “Experimental Study of Emission Parameters of Biodiesel Fuels Obtained from Canola, Hazelnut, and Waste Cooking Oils”. *Energy & Fuels* 21: pp. 3622 – 3626;

Kusdiana, D., Saka, S., 2004. “New process for Non-catalytic Production Via Hydrolysis and Subsequent Methyl Esterification”. 2<sup>nd</sup> World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection Proceedings, pp. 1484 - 1487; 10 – 14 May, Rome, Italy;

Labeckas, G., Slavinskas, S., 2006. “The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions”. *Energy Conversion and Management* 47: pp. 1954 – 1967.

Lapuerta, M., Armas, O., Ballesteros, R., 2002. “Diesel particulate emissions from biofuels derived from Spanish vegetable oils”. SAE paper;

Lapuerta, M., Armas, O., Fernández, J., 2008. “Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions”. *Progress in Energy and Combustion Science* 34: pp. 198 – 223;

Lebedevas, S., Vaicekauskas, A., Lebedeva, G., Makareviciene, V., Janulis, P., 2007. “Change in Operational Characteristics of Diesel Engines Running on RME Biodiesel Fuel”. *Energy & Fuels* 21: pp. 3010 – 3016;

Leung, D., Luo, Y., Chan, T., 2006. “Optimization of exhaust emissions of a diesel engine fuelled with biodiesel”. *Energy Fuels* 20: pp. 1015 – 1023;

LNEG, 2005. “PT(A) 5.4.2 – Determinação dos teores em CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> com o analisador de gases TESTO 350”. 1<sup>a</sup> Edição;

Martins, J., 2006. “Motores de combustão interna por compressão”. 2<sup>a</sup> edição. Publindústria, Artes Gráficas;

- Mikkonen, S., 2007. "NExBTL . premium quality 2nd generation hydrogenated renewable diesel fuel". 2007 JSAE/SAE International Fuels and Lubricants Meeting. July 23.26, Kyoto, Japan;
- Monyem, A., Van Gerpen, J., 2001. "The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions". Biomass Bioenergy 20: pp. 317 – 325;
- Murillo, S., Míguez, J., Porteiro, J., Granada, E., Mórán, J., 2007. "Performance and exhaust emissions in the use of biodiesel in outboard diesel engines". Fuel 86: pp. 1765 – 1771;
- Nils-Olof, N., Aakko-Saksa, P., Sipila, K., 2008. "Status and outlook for biofuels, other alternative fuels and new vehicles". VTT research notes 2426. VTT Technical research center of Finland. (<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2008/T2426.pdf>, 11 de Março de 2009);
- Odgers, J., Kreschmer, D., 1986. "Gas Turbine and Their Influence on Combustion". Abacus Press;
- Ozkan, M., 2007. "Comparative Study of the Effect of Biodiesel and Diesel Fuel on a Compression Ignition Engine's Performance, Emissions, and Its Cycle by Cycle Variations". Energy & Fuels, 21, pp. 3627 – 3636;
- Oliveira, A., C.Rosa, M. F., 2004. " Biodiesel production by enzymatic catalysis". 2<sup>nd</sup> World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection Proceedings, pp. 1488 – 1491; 10 – 14 May, Rome, Italy;
- Oliveira, A. C., Rosa, M.F., 2005. "Raw Materials for Biodiesel Production in Portugal". 14<sup>th</sup> European Biomass Conference Proceedings, pp. 1083 – 1085; 17 – 21 October 2005, Paris, France;
- Rakopoulos, C., Hountalas, D., Zannis, T., Levendis, Y., 2004. "Operational and environmental evaluation of diesel engines burning oxygen-enriched intake air or oxygen-enriched fuels: a review". SAE paper;
- Rakopoulos, C., Rakopoulos, D., Hountalas, D., Giakoumis, E., Andritsakis, E., 2008. "Performance and emissions of bus engine using blends of diesel fuel with bio-diesel

of sunflower or cottonseed oils derived from Greek feedstocks”. Fuel 87: , pp. 147 - 157;

Raimundo, N., 2007. Investigação de dioxinas, furanos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos no material particulado e gases emitidos por motores de combustão interna por compressão. Universidade de São Paulo, Faculdade de Saúde Pública. Tese apresentada à Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Saúde Pública;

Ramadhas, A.S., Muraleedharan, C., Jayaraj, S., 2005. “Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil”. Renewable Energy 30: pp. 1789 – 1800;

Rantanen, L., Linnaila, R., Aakko, P., Harju, T., 2005. “NExBTL – biodiesel fuel of the second generation”. SAE International;

RENEW, 2008. “Renewable fuels for advanced power trains”. Final report. SYNCOM Forschungs- und Entwicklungsberatung GmbH (<http://www.renew-fuel.com>, 10 de Outubro de 2008);

RENEW(a), 2008. “Renewable fuels for advanced power trains – WP5.4: Technical assessment scientific report”. SYNCOM Forschungs- und Entwicklungsberatung GmbH (<http://www.renew-fuel.com>, 26 de Outubro de 2008);

Rosa, M. F., 2007. “Módulo 4.2 e 4.3 – Liquid Biofuels”. International Master in Environment and Energy. Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa;

Santos, F.D. e Miranda, P., 2006. “Alterações Climáticas em Portugal: cenários, impactos e medidas de adaptação – projecto SIAM II”. Gradiva, Lisboa;

Schaberg, P., Myburgh, I., Botha, J., Roets, P., Viljoen, C., Dancuart, L., Star, M., 1997. “Diesel Exhaust Emissions Using Sasol Slurry Phase Destillate Fuels”. SAE paper 972898;

Schmidt K., Van Gerpen, J., 1996. “The effect of biodiesel fuel composition on diesel combustion and emissions”. SAE paper, 961086;

Signal Group, 2003. “MODEL 3030PM Portable heated VOC analyser operating manual”. Signal Group Ltd;

TESTO 350 – Manual. “TESTO 350 – Flue gas analyser: instruction manual with maintenance manual”;

TESTO 339 – Manual. “TESTO 339 – Gas preparation system for long-term measurements on industrial heating plants: instruction manual”;

TESTO, 2009. (<http://www.testo350.com/350faqs.html#aa>, 3 de Janeiro de 2009);

Thuijl, E., Roos, C., Beurskens, L., 2003. “An overview of biofuels technologies, markets and policies in Europe”. Energy research Centre of the Netherlands. (<http://www.ecn.nl>, 10 Junho 2008);

Tong, H., Sweetman, J., Karasek, F., 1984. “Quantitative analysis of polycyclic aromatic compounds in diesel exhaust particulate extracts by combined chromatographic techniques”. J. Chromatographic 312: pp. 183 - 202;

Turns, S., 2000. “An Introduction to Combustion – Concepts and Applications”. McGraw-Hill, 2ª Edição;

Turrio-Baldassarri, L., Battistelli, C., Conti, L., Crebelli, R., De Berardis, B., Iamiceli, A., et al., 2004. “Emission comparison of urban bus engine fuelled with diesel oil and biodiesel blend”. Science of the Total Environment 327: pp. 147 – 162;

UOP, 2006. Universal Oil Products. “Opportunities for Biorenewables in Oil Refineries”. First Technical Report, DOE Award Number DE-FG36-05GO15085. (<http://www.energy.gov/>, 20 de Março de 2009);

US EPA. United States Environmental Protection Agency. “method 1 - Sample and velocity traverses for stationary sources”; pp. 181 – 205 (<http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate.html>, 20 de Fevereiro de 2009);

US EPA. United States Environmental Protection Agency. “method 1A - Sample and velocity traverses for stationary sources with small stacks or ducts”; pp. 206 – 213 (<http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate.html>, 20 de Fevereiro de 2009);

US EPA. United States Environmental Protection Agency. “method 2 - Determination of stack gas velocity and volumetric flow rate (type S pitot tube)”; pp. 214 - 252 (<http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate.html>, 20 de Fevereiro de 2009);

US EPA. United States Environmental Protection Agency. “method 3 - Gas analysis for the determination of dry molecular weight”; pp. 312 - 329 (<http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate.html>, 20 de Fevereiro de 2009);

US EPA. United States Environmental Protection Agency. “method 4 - Determination of moisture content in stack gases”; pp. 347 - 370 (<http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate.html>, 20 de Fevereiro de 2009);

US EPA. United States Environmental Protection Agency. “method 5 - Determination of particulate matter emissions from stationary sources”; pp. 371 - 442 (<http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate.html>, 20 de Fevereiro de 2009);

US EPA. United States Environmental Protection Agency. “method 17 - Determination of particulate matter emissions from stationary sources”; pp. 1035 - 1047 (<http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate.html>, 20 de Fevereiro de 2009);

US EPA. United States Environmental Protection Agency. “method 25A - Determination of total gaseous organic concentration using a flame ionization analyzer”; pp. 1250 - 1262 (<http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate.html>, 20 de Fevereiro de 2009);

USEPA, 2002. United States Environment Protection Agency. “A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions”. Draft Technical Report, EPA420-P-02-001 (<http://www.epa.gov/oms/models/biodsl.htm>, Julho 2008);

Utlü, Z., Kocak, M., 2008. “The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions”. Renewable Energy 33: pp 1936–1941;

Vallero, D., 2008. “Fundamentals of Air Pollution”. Academic Press- fourth edition;

Zhang, C., 2007. “Fundamentals of environmental sampling and analysis”. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey;





Página Propositadamente Deixada em Branco

## 10 ANEXOS

### Anexo 1 – Ácidos gordos e glicerol

**Quadro 10-1 - Ácidos gordos mais comuns presentes em óleos e gorduras para produção de biodiesel (adaptado de Rosa, 2007)**

Ácido gordo	N.º átomos de carbono: n.º ligações duplas	Estrutura química
Caprílico	C8	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$
Cáprico	C10	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$
Láurico	C12	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$
Mirístico	C14	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$
Palmítico	C16:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$
Palmitoleico	C16:1	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Esteárico	C18:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$
Oleico	C18:1	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Linoleico	C18:2	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CHCH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Linolénico	C18:3	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Araquídico	C20:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$
Eicosenoico	C20:1	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_9\text{COOH}$
Beénico	C22:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$
Erúico	C22:1	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_{11}\text{COOH}$
Lignocérico	C24:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{22}\text{COOH}$

**Quadro 10-2 - Percentagem de ácidos gordos em óleos das culturas energéticas mais frequentes para a produção de biodiesel (adaptado de Knothe *et al.*, 2005)**

Ácido gordo	N.º átomos de carbono: n.º ligações duplas	Girassol (%)	Soja (%)	Colza (%)	Palma (%)
Cáprico	C10:0	---	---	---	0,0 – 0,4
Láurico	C12:0	---	---	---	0,5 – 2,4
Mirístico	C14:0	---	---	0,0 – 1,5	32,0 – 47,5
Palmítico	C16:0	3,5 – 7,6	2,3 – 13,3	1,0 – 6,0	3,5 – 6,3
Esteárico	C18:0	1,3 – 6,5	2,4 – 6,0	0,5 – 3,5	36,0 – 53,0
Oleico	C18:1	14,0 – 43,0	17,7 – 30,8	8,0 – 60,0	6,0 - 12
Linoleico	C18:2	44,0 – 74,0	49,0 – 57,1	9,5 – 23,0	---
Linolénico	C18:3	---	2,0 – 10,5	1,0 – 13,0	---
Erúico	C22:1	---	0,0 – 0,3	5,0 – 64,0	---

**Quadro 10-3 - Principais propriedades do glicerol (adaptado de Knothe *et al.*, 2005)**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
Ponto de fusão (K)	291,32
Ponto de ebulição (K) a 101,3 KPa	563,15
Pressão do vapor (Pa) a 373,15 K	526,00
Tensão superficial (293,15 K, mN/m)	63,40
Viscosidade (293,15 K, mPa.s)	1499,00
Calor de Vaporização (J/mol) a 368,15 K	76,02
Calor de formação (kJ/mol)	667,80
Conductividade térmica [W/(m.K)]	0,28

## Anexo 2 – EN 14214

**Quadro 10-4 - Norma Europeia EN 14214 (adaptado de Knothe *et al.*, 2005 e Rosa, 2007)**

Parâmetro	unidades	Valor		Referencial utilizado
Teor em ésteres metílicos	% (m/m)	min	96,5	EN 1413
Densidade, 15°C	kg/m <sup>3</sup>		860 - 900	EN ISO 3675, EN ISO 12185
Viscosidade, 40°C	mm <sup>2</sup> /s		3,5 - 5	EN ISO 3104, ISO 3105
Ponto de inflamação	°C	min	120	EN ISO 3679
Teor em enxofre	mg/kg	max	10	EN ISO 20846, EN ISO 20884
Resíduo carbonoso (10% do resíduo de destilação)	% (m/m)	max	0,3	EN ISO 10370
Número de cetano		min	51	EN ISO 5165
Teor de cinzas sulfatadas	% (m/m)	max	0,02	ISO 3987
Teor de água	mg/kg	max	500	EN ISO 12937
Contaminação total	mg/kg	max	24	EN 12662
Corrosão da lamina de cobre (3h, 50 °C)		max	1	EN ISO 2160
Estabilidade à oxidação, 110 °C	hr	min	6	EN 14112
Índice de acidez	mgKOH/g	max	0,5	EN 14104
Índice de iodo	g iodine/100 g	max	120	EN 14111
Éster metílico do ácido linolénico	% (m/m)	max	12	EN 14103
Ésteres metílicos poliinsaturados (≥ 4 ligações duplas)	% (m/m)		1	
Teor de metanol	% (m/m)	max	0,2	EN 14110
Teor em monoglicéridos	% (m/m)	max	0,8	EN 14105
Teor em diglicéridos	% (m/m)	max	0,2	EN 14105
Teor em triglicéridos	% (m/m)	max	0,2	EN 14105

**Quadro 10-5 - Norma Europeia EN 14214 (adaptado de Knothe *et al.*, 2005 e Rosa, 2007) (Continuação)**

<b>Parâmetro</b>	<b>unidades</b>	<b>Valor</b>		<b>Referencial utilizado</b>
Glicerol livre	% (m/m)	max	0,02	EN 14105, EN 14106
Glicerol total	% (m/m)	max	0,25	EN 14105
Metais alcalinos (Na+ K)	mg/kg	max	5	EN 14108, EN 14109
Metais alcalino-terrosos (Ca + Mg)	mg/kg	max	5	prEN 14538
Teor em fósforo	mg/kg	max	10	EN 14107
CFPP <sup>26</sup> (temperatura limite de filtrabilidade)	°C	---	---	A definir por cada país

---

<sup>26</sup> CFPP é definido como a temperatura mais baixa à qual 20 ml de óleo passam, de forma segura, pelo filtro, num espaço de tempo inferior a 60 s (Knothe et al, 2005).

### Anexo 3 – Registo da amostragem de gases (NO<sub>x</sub>, CO e O<sub>2</sub>)

**Quadro 10-6 – Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de Gases**

Condição de ensaio	B0			B15.1			B30.1			B15.2			B30.2		
	% O <sub>2</sub>	ppm CO	ppm NO <sub>x</sub>	% O <sub>2</sub>	ppm CO	ppm NO <sub>x</sub>	% O <sub>2</sub>	ppm CO	ppm NO <sub>x</sub>	% O <sub>2</sub>	ppm CO	ppm NO <sub>x</sub>	% O <sub>2</sub>	ppm CO	ppm NO <sub>x</sub>
<b>I</b>	17,6459	160	171	17,6116	159	150	17,9172	112	163	17,8454	124	163	17,6268	122	179
	17,6367	159	171	17,6038	162	150	17,9105	112	164	17,8585	127	163	17,6389	124	179
	17,6293	161	169	17,6028	164	149	17,9236	118	161	17,8437	129	164	17,6447	122	180
	17,6419	163	169	17,6354	160	151	17,916	116	163	17,8426	130	164	17,637	121	178
	17,6751	162	171	17,6207	161	151	17,9085	118	162	17,8546	128	164	17,6496	124	177
	17,639	160	167	17,5924	166	151	17,9215	121	162	17,8887	129	164	17,6345	123	175
	17,639	162	168	17,6045	168	151	17,9013	122	162	17,8945	130	164	17,6481	124	176
	17,6579	162	166	17,583	167	152	17,9144	121	163	17,8871	128	164	17,6258	126	181
	17,6287	161	166	17,6094	165	151	17,9144	120	163	17,8723	131	162	17,6316	125	178
	17,6344	160	168	17,6079	168	153	17,9056	119	164	17,8991	132	163	17,6448	129	178
	17,647	163	163	17,6268	170	151	17,906	119	165	17,8911	132	163	17,6501	126	178
	17,6602	165	162	17,6458	166	151	17,8922	119	164	17,9042	131	163	17,6496	129	176

**Quadro 10-7 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de Gases (continuação)**

Condição de ensaio	B0			B15.1			B30.1			B15.2			B30.2		
	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx
<b>I</b>	17,6585	161	162	17,6448	171	150	17,912	121	164	17,89	131	164	17,6351	129	176
	17,6642	165	162	17,6307	167	150	17,9112	120	164	17,8963	132	163	17,6346	127	176
	17,6699	164	162	17,6292	168	149	17,891	120	164	17,8884	135	162	17,6468	127	176
	17,6762	161	161	17,6209	169	149	17,8898	120	163	17,8947	132	164	17,6327	122	175
	17,6751	161	162	17,6336	168	149	17,8969	123	161	17,8799	132	163	17,6317	121	176
	17,6528	160	159	17,6185	169	151	17,8961	122	161	17,8851	134	163	17,6376	123	175
	17,6723	164	160	17,6248	168	148	17,8894	124	163	17,8919	132	163	17,6439	121	177
	17,658	163	161	17,6574	167	148	17,8953	123	162	17,8772	134	162	17,643	121	177
	17,65	159	160	17,6224	166	152	17,8949	125	161	17,8908	133	162	17,643	117	177
<b>II</b>	15,1586	1465	204	14,6109	1472	287	14,7535	1340	267	14,8315	1323	268	14,7431	1492	293
	14,8228	1525	242	14,6033	1457	288	14,8293	1375	256	14,8588	1337	268	14,7431	1504	289
	14,8075	1625	243	14,6302	1481	288	14,8767	1351	246	14,8375	1337	272	14,7286	1557	291
	14,82	1604	244	14,6299	1510	286	14,3412	1360	324	14,8514	1310	271	14,742	1520	287
	14,832	1598	247	14,6222	1519	287	14,3546	1197	341	14,8506	1337	276	14,7067	1499	289
	14,8237	1593	242	14,6153	1495	289	14,4028	1201	331	14,8159	1337	278	14,7336	1484	289



**Quadro 10-8 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de Gases (continuação)**

Condição de ensaio	B0			B15.1			B30.1			B15.2			B30.2		
	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx
II	14,8432	1600	251	14,6489	1462	287	14,5056	1276	307	14,8159	1325	275	14,7474	1516	289
	14,8269	1561	255	14,6758	1434	287	14,5396	1298	297	14,7947	1328	277	14,7539	1500	285
	14,819	1556	257	14,6551	1479	288	14,814	1346	260	14,8085	1297	279	14,7252	1570	290
	14,8177	1564	252	14,6474	1456	287	14,7522	1386	269	14,8501	1277	282	14,7045	1564	286
	14,8158	1541	259	14,654	1442	289	14,8205	1371	263	14,8562	1232	282	14,7175	1523	287
	14,8001	1550	261	14,6467	1449	294	14,7725	1367	270	14,8558	1219	281	14,7306	1542	289
	14,7987	1543	258	14,6733	1434	295	14,7866	1377	268	14,8484	1236	283	14,7444	1527	283
	14,8247	1550	257	14,6726	1405	295	14,8751	1391	260	14,8623	1155	285	14,7505	1574	283
	14,8373	1571	250	14,6788	1380	295	14,8473	1407	263	14,8341	1169	287	14,7429	1528	285
	14,8142	1533	255	14,6581	1413	294	14,8477	1391	264	14,861	1160	286	14,7494	1511	285
	14,778	1589	252	14,637	1428	293	14,8741	1383	259	14,861	1165	285	14,7142	1536	286
	14,7902	1559	255	14,6778	1446	292	14,9225	1368	242	14,8329	1192	287	14,7349	1525	286
	14,7888	1491	263	14,684	1436	292	14,9156	1342	248	14,8394	1217	286	14,7548	1520	286
	14,7871	1463	261	14,656	1449	291	14,7784	1186	248	14,839	1214	287	14,7541	1546	286
	14,7857	1516	254	14,6691	1444	290	14,3587	1207	345	14,8312	1205	288	14,7541	1518	286

**Quadro 10-9 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de Gases (continuação)**

Condição de ensaio	B0			B15.1			B30.1			B15.2			B30.2		
	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx
<b>III</b>	10,1839	265	521	10,1114	327	551	9,97635	273	536	9,97661	373	562	10,0546	257	551
	10,2195	267	500	10,09	354	565	10,0612	276	523	9,9552	369	558	10,0756	252	553
	10,1836	325	522	10,0329	333	564	10,0396	288	541	9,9478	371	563	10,1603	251	559
	10,0904	281	530	9,99048	345	564	10,061	268	551	10,0186	354	568	10,1175	265	555
	10,1759	259	526	10,1185	327	566	10,0325	262	549	10,0044	327	569	10,0749	299	557
	10,1614	267	507	10,0043	333	574	10,0533	268	557	9,97555	326	570	10,0886	281	560
	10,1329	339	536	10,0045	351	570	10,0464	252	556	10,011	318	573	10,0316	277	555
	10,1472	276	537	9,98314	340	572	10,025	250	547	9,9893	352	576	9,98847	274	554
	10,1609	256	534	9,94735	351	576	10,0246	273	554	10,039	336	578	9,90299	285	557
	10,1179	317	502	9,98248	342	581	10,0387	242	555	9,98164	327	578	9,91696	262	559
	10,1319	344	529	9,98292	354	584	10,0458	270	555	9,96685	325	579	9,89517	267	560
	10,1242	275	541	9,95424	337	576	9,99586	258	556	9,97398	340	585	9,95154	251	559
	9,87433	369	506	9,95402	328	580	9,99607	262	547	9,98085	334	579	9,92999	288	561
	10,0313	279	551	9,91844	326	582	9,91785	289	532	9,98085	346	580	9,90134	263	564
	10,0881	279	546	9,90399	330	577	9,99565	265	561	10,0017	351	584	9,96527	283	568
	10,0448	294	511	9,85416	332	585	9,99522	248	565	10,0155	346	585	9,99273	270	568
	10,0662	300	551	9,88976	335	584	10,0096	246	558	9,95841	347	586	9,92148	282	569

**Quadro 10-10 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de Gases (continuação)**

Condição de ensaio	B0			B15.1			B30.1			B15.2			B30.2		
	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx	% O2	ppm CO	ppm NOx
<b>III</b>	10,0873	279	550	9,90377	348	588	10,0379	264	565	9,94363	338	576	9,92148	269	570
	9,99412	331	507	9,87508	352	589	10,0372	259	566	9,93624	366	582	9,90658	278	575
	10,0367	342	544	9,8822	348	587	9,96652	265	561	9,98617	357	584	9,88527	310	572
	10,0219	287	551	9,93202	362	586	10,0302	256	572	9,99304	356	579	9,98446	270	575

## Anexo 4 – Registo da amostragem de PTS

Quadro 10-11 – Dados obtidos durante a amostragem de PTS, no módulo de controlo, para B0

Condição de ensaio	Tempo (min)	Volume (m <sup>3</sup> )	Vácuo bomba (inHg)	$\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta H$ (mmH <sub>2</sub> O)	Ts (°C)	T <sub>m</sub>	
							entrada (°C)	saída (°C)
<b>I</b>	0	56,973	3,00	8,50	28,07	27,90	26	23
	5	57,035	3,00	8,50	28,10	27,50	30	23
	10	57,120	3,00	8,50	28,10	27,70	32	24
	15	57,218	3,75	8,50	28,10	27,80	34	25
	20	57,330	3,75	8,50	28,10	27,60	35	26
	25	57,424	3,75	8,50	28,10	27,60	36	27
<b>II</b>	0	57,586	5,00	17,00	53,34	32,30	27	25
	5	57,690	5,00	17,00	53,30	32,80	31	26
	10	57,815	6,00	17,50	53,30	33,20	35	26
	15	57,965	7,00	17,50	53,30	33,20	37	28
	20	58,067	7,50	17,50	53,30	33,50	38	29
		58,180	8,00	17,00	53,30	33,60	39	30
	25	58,310	3,75	17,50	53,30	33,60	40	30
<b>III</b>	0	58,322	6,00	23,50	73,66	33,00	32	29
	5	58,450	6,00	24,50	73,70	35,60	38	30
	10	58,549	7,00	24,50	73,70	36,00	40	30
	15	58,660	7,00	24,50	73,70	36,20	41	31
	20	58,792	8,00	24,50	73,70	36,50	42	31
		59,027	9,00	24,50	73,70	36,40	44	33
	25	59,152	9,00	24,50	73,70	36,50	44	33

**Quadro 10-12 – Dados obtidos durante a amostragem de PTS, no módulo de controlo, para B15.1**

Condição de ensaio	Tempo (min)	Volume (m <sup>3</sup> )	Vácuo bomba (inHg)	$\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta H$ (mmH <sub>2</sub> O)	Ts (°C)	T <sub>m</sub>	
							entrada (°C)	saída (°C)
<b>I</b>	0	55,310	2,00	2,50	7,87	30,90	28	28
	5	55,362	2,00	3,00	7,90	31,30	30	28
	10	55,403	1,50	3,00	9,14	31,30	30	28
	15	55,428	1,50	3,00	9,10	31,30	31	28
	20	55,480	1,50	3,00	9,10	31,30	33	29
		55,521	1,50	3,00	9,10	31,10	34	29
	25	55,566	1,50	3,00	9,10	31,00	35	30
<b>II</b>	0	55,568	5,00	17,00	53,34	35,00	33	30
	5	55,645	6,00	17,00	53,30	35,10	38	31
	10	55,782	6,00	17,00	53,30	35,10	40	32
	15	55,914	6,50	16,00	53,30	35,10	42	32
	20	56,014	7,00	16,00	53,30	35,10	43	33
		56,115	6,00	16,00	53,30	35,00	44	34
	25	56,221	5,50	16,00	53,30	35,10	44	34
<b>III</b>	0	56,231	6,50	24,50	78,74	35,00	36	33
	5	56,373	7,00	25,00	78,70	36,80	42	33
	10	56,500	7,00	25,00	78,70	37,60	44	33
	15	56,610	8,00	25,00	78,70	37,50	45	34
	20	56,700	8,50	25,00	78,70	37,30	46	35
		56,828	9,00	25,00	78,70	37,90	47	35
	25	56,961	9,50	25,00	78,70	37,90	47	35

**Quadro 10-13 – Dados obtidos durante a amostragem de PTS, no módulo de controle, para B15.2**

Condição de ensaio	Tempo (min)	Volume (m <sup>3</sup> )	Vácuo bomba (inHg)	$\Delta P$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta H$ (mmH <sub>2</sub> O)	Ts (°C)	T <sub>m</sub>	
							entrada (°C)	saída (°C)
<b>I</b>	0	59,155	3,75	9,50	30,48	28,00	23	23
	5	59,256	3,75	9,50	30,50	27,60	26	23
	10	59,34,5	3,75	9,50	30,50	27,50	29	23
	15	59,469	4,00	10,00	30,50	27,60	30	24
	20	59,543	4,00	9,50	30,50	27,70	31	25
		59,602	4,00	9,50	30,50	27,70	32	25
	25	59,663	4,00	9,50	30,50	27,70	32	26
<b>II</b>	0	59,700	6,00	20,00	64,77	31,00	30	26
	5	59,805	6,50	20,00	64,80	32,50	40	29
	10	59,978	7,00	20,00	64,80	32,50	42	30
	15	60,096	7,00	20,00	64,80	32,80	42	30
		60,242	7,00	20,00	64,80	32,80	42	30
	20	60,614	5,50	20,00	64,80	32,80	43	31
<b>III</b>	0	60,619	7,80	28,00	86,36	34,00	32	29
	5	60,770	8,00	28,00	86,40	35,40	38	29
	10	60,925	9,00	28,00	86,40	36,10	41	30
	15	61,037	9,00	28,00	86,40	36,40	41	30
	20	61,210	10,00	28,00	86,40	36,70	43	31
		61,340	10,00	28,00	86,40	36,80	44	32
	24	61,362	7,00	28,00	86,40	36,90	44	32

**Quadro 10-14 – Dados resultantes da pesagem dos “impingers”, para B0**

Condição de ensaio	“Impinger”	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Diferença (g)	Total (g)
<b>I</b>	1	600,0	600,3	0,3	4,2
	2	538,9	539,8	0,9	
	3	500,0	500,3	0,3	
	4	687,6	690,3	2,7	
<b>II</b>	1	605,6	615,1	9,5	15,8
	2	539,9	541,5	1,6	
	3	500,4	500,8	0,4	
	4	691,2	695,5	4,3	
<b>III</b>	1	615,1	630,5	15,4	24,5
	2	541,5	544,3	2,8	
	3	500,8	501,9	1,1	
	4	695,5	700,7	5,2	

**Quadro 10-15 – Dados resultantes da pesagem dos “impingers”, para B15.1**

Condição de ensaio	“Impinger”	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Diferença (g)	Total (g)
<b>I</b>	1	602,2	604,4	2,2	4,2
	2	573,3	573,4	0,1	
	3	507,2	507,4	0,2	
	4	725,6	727,3	1,7	
<b>II</b>	1	604,4	612,8	8,4	14,7
	2	573,4	575,1	1,7	
	3	507,4	507,9	0,5	
	4	727,3	731,4	4,1	
<b>III</b>	1	612,8	624,7	11,9	18,7
	2	575,1	577,5	2,4	
	3	507,9	508,2	0,3	
	4	731,4	735,5	4,1	

**Quadro 10-16 – Dados resultantes da pesagem dos “impingers”, para B15.2**

Condição de ensaio	“Impinger”	Massa Inicial	Massa Final	Diferença	Total
		(g)	(g)	(g)	(g)
I	1	630,5	633,4	2,9	6,2
	2	544,3	544,5	0,2	
	3	501,9	502,1	0,2	
	4	704,7	707,6	2,9	
II	1	633,4	646,7	13,3	21,4
	2	544,5	546,5	2,0	
	3	502,1	502,6	0,5	
	4	707,6	713,2	5,6	
III	1	646,7	661,1	14,4	24
	2	546,5	548,9	2,4	
	3	502,6	503,3	0,7	
	4	713,2	719,7	6,5	

**Quadro 10-17 – Dados resultantes da pesagem dos filtros (B0, B15.1 e B15.2)**

Condição de ensaio	Filtro	Filtro + Partículas	Partículas
	(g)	(g)	(g)
B0 - I	1,8071	1,8143	0,0072
B0 - II	1,5673	1,6089	0,0416
B0 - III	1,6395	1,6611	0,0216
B15.1 - I	1,4302	1,4366	0,0064
B15.1 - II	1,8352	1,8707	0,0355
B15.1 - III	1,6783	1,6977	0,0194
B15.2 - I	1,7176	1,7227	0,0051
B15.2 - II	1,5318	1,5522	0,0204
B15.2 - III	1,7988	1,8115	0,0127



## Anexo 5 – Registo da amostragem de HC

Quadro 10-18 – Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de HC

Condição de ensaio	HC (ppm Propano, base húmida)				
	B0	B15.1	B30.1	B15.2	B30.2
I	20	17	11	18	10
	21	17	11	16	10
	20	18	11	18	10
	19	17	12	18	11
	19	18	11	18	11
	20	18	11	18	10
	18	17	12	17	12
	17	18	11	16	11
	18	20	12	17	12
	17	19	12	16	11
	19	18	14	16	12
	18	17	14	16	11
	18	18	14	19	12
	19		15	18	13
	18		14	19	12
	18		14	19	13
	18		15	18	12
	18		14	17	13

**Quadro 10-19 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de HC (continuação)**

Condição de ensaio	HC (ppm Propano, base húmida)				
	B0	B15.1	B30.1	B15.2	B30.2
<b>I</b>	19		13	18	12
	15		14	17	13
	15		15	18	12
	15		15	17	12
	16		14	17	12
	15		16	18	12
	16		15	17	12
<b>II</b>	790	800	800	709	760
	782	830	838	720	760
	800	787	770	703	778
	810	750	800	715	780
	812	770	790	708	790
	805	780	780	720	785
	810	810	785	725	774
	688	800	768	645	750
	710	742	738	670	760
	815	685	730	680	780
	830	740	740	690	760
	748	735	670	700	770
	800	780	752	670	760
	810	730	680	680	770
	816	740	730	650	760

**Quadro 10-20 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de HC (continuação)**

Condição de ensaio	HC (ppm Propano, base húmida)				
	B0	B15.1	B30.1	B15.2	B30.2
<b>II</b>	830		800	660	780
	800		790	660	800
	820		780	683	790
	820		780	650	810
	780		780		800
	790		800		820
			780		813
					810
					790
					810
					800
					810
					790
					798
					810
<b>III</b>	13	13	14	10	12
	12	12	14	11	11
	14	14	14	11	12
	12	12	14	12	12
	11	13	14	10	12
	10	11	15	11	11
	22	12	15	12	11
	20	10	13	12	13
	18	11	13	13	13

**Quadro 10-21 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem de HC (continuação)**

Condição de ensaio	HC (ppm Propano, base húmida)				
	B0	B15.1	B30.1	B15.2	B30.2
<b>III</b>	13	12	14	11	10
	14	16	13	12	11
	10	14	12	11	12
	20	13	12	12	13
	18	11	12	12	12
	16	12	13	11	14
	19	10	12	10	13
	8	11	12	11	13
	7		12	10	13
	10		11	12	13
	8		11	11	14
	9		12	10	13
	10		11	10	
	11		11	9	
	7		11	9	
	9		11	9	
	10		10	10	
	12				
	8				
	9				

## Anexo 6 - Registo da amostragem da temperatura

**Quadro 10-22 – Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem da temperatura dos gases de escape (°C) e temperatura ambiente na entrada de ar no motor (°C)**

Condição de ensaio	Temperatura dos gases de escape (°C)					Temperatura ambiente na entrada de ar no motor (°C)				
	B0	B15.1	B30.1	B15.2	B30.2	B0	B15.1	B30.1	B15.2	B30.2
I	104,10	111,50	105,90	104,60	105,10	33,70	37,20	43,90	35,20	40,60
	103,70	112,10	105,30	104,50	104,70	33,50	37,40	43,90	35,10	41,20
	103,20	112,00	105,20	104,20	104,60	32,80	37,10	43,80	34,90	40,80
	103,60	112,30	105,00	103,40	104,50	33,60	37,40	43,40	35,20	40,90
	103,90	112,20	104,60	103,80	104,00	33,50	37,40	43,80	34,90	40,60
	103,60	112,30	104,40	104,00	104,20	32,80	37,40	43,60	35,10	40,50
	103,00	112,10	104,50	103,60	104,20	32,20	37,20	43,80	34,50	40,30
	103,30	111,90	103,70	103,60	104,00	32,60	37,00	42,90	34,90	40,30
	103,60	111,90	103,90	103,10	104,20	33,00	37,20	42,50	35,70	40,50
	103,70	112,10	103,70	103,20	104,10	32,90	37,10	42,80	35,50	40,80
	103,40	112,20	104,30	103,60	103,90	32,20	37,00	43,10	35,40	40,40
	103,40	112,40	104,00	103,60	104,00	32,60	37,50	42,90	34,10	40,50
	103,70	112,60	103,60	103,60	104,00	32,80	37,60	42,70	34,30	40,30
	103,60	112,30	103,40	103,40	103,70	33,10	37,80	43,20	34,40	40,30
	103,70	112,40	103,70	103,60	103,90	32,50	37,80	42,60	34,30	40,60
	104,10	111,70	103,70	103,70	103,80	33,00	37,60	43,10	34,60	40,40
	104,30	111,50	103,90	103,70	103,80	32,60	37,50	42,80	34,30	40,40
	104,20	112,10	103,70	103,50	103,70	33,10	37,60	42,50	34,20	40,50
	104,20	112,10	103,40	103,70	103,60	32,50	37,50	42,30	34,20	40,60
	104,20	112,30	103,30	103,40	103,50	32,50	37,30	42,30	34,70	40,50
	104,60	111,80	103,50	103,70	103,60	33,00	37,40	42,50	35,00	40,20

**Quadro 10-23 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem da temperatura dos gases de escape (°C) e temperatura ambiente na entrada de ar no motor (°C) (continuação)**

Condição de ensaio	Temperatura dos gases de escape (°C)					Temperatura ambiente na entrada de ar no motor (°C)				
	B0	B15.1	B30.1	B15.2	B30.2	B0	B15.1	B30.1	B15.2	B30.2
II	255,90	265,00	278,60	258,20	263,80	40,50	42,50	43,90	40,00	44,30
	256,10	265,40	279,10	258,60	264,50	41,00	42,80	44,90	39,70	44,50
	255,50	264,90	278,90	259,60	265,00	40,80	42,40	45,20	40,50	44,00
	256,30	264,70	276,20	259,60	265,30	40,90	43,20	45,60	39,80	44,20
	256,30	264,60	275,50	260,00	265,00	41,30	42,10	45,50	41,00	44,90
	256,30	265,00	266,60	260,00	265,10	41,00	42,00	45,60	41,20	44,40
	256,90	264,30	267,40	258,70	266,20	41,30	42,60	45,20	40,30	45,00
	257,50	265,50	266,50	258,20	266,40	41,40	42,50	45,40	40,30	44,60
	258,00	264,50	266,50	258,70	267,00	41,40	42,70	45,40	40,30	45,10
	258,00	263,60	265,60	258,00	265,40	41,60	42,80	45,80	40,40	45,10
	257,90	263,70	265,30	258,20	265,60	41,20	41,60	45,40	40,10	44,50
	257,50	264,20	266,70	258,40	266,40	41,20	41,90	45,30	40,90	44,80
	258,40	264,90	264,50	258,10	266,30	40,80	42,50	45,20	40,90	45,00
	258,90	264,40	265,50	258,10	266,60	41,10	42,80	45,70	41,30	45,60
	257,90	264,00	267,80	258,90	266,70	40,90	44,00	45,60	40,90	45,10
	258,50	264,70	269,40	258,70	266,90	41,10	42,50	45,20	40,50	45,10
	258,90	264,80	281,50	258,80	266,50	41,40	42,10	45,20	40,90	45,00
	258,80	263,80	280,70	259,40	265,80	41,70	43,50	45,00	41,60	45,70
	258,70	264,40	273,00	259,00	266,70	41,60	42,70	46,20	40,00	45,70
	258,80	264,80	273,40	258,70	267,30	40,40	42,10	46,00	40,90	45,00
	259,00	264,80	271,70	258,60	267,30	40,80	43,10	45,50	40,70	45,40

**Quadro 10-24 - Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem da temperatura dos gases de escape (°C) e temperatura ambiente na entrada de ar no motor (°C) (continuação)**

Condição de ensaio	Temperatura dos gases de escape (°C)					Temperatura ambiente na entrada de ar no motor (°C)				
	B0	B15.1		B0	B15.1		B0	B15.1		B0
<b>III</b>	427,40	431,40	432,60	438,50	437,80		46,20	47,30	52,30	49,20 52,20
	424,70	433,10	433,70	438,30	436,60		46,60	46,40	51,90	49,60 52,70
	425,60	436,20	432,90	438,70	437,90		48,20	47,30	51,20	50,40 53,50
	427,20	436,50	434,20	437,40	439,50		47,60	46,50	52,70	49,60 53,30
	426,70	436,20	434,60	437,70	441,30		47,90	47,10	52,20	50,00 53,90
	427,00	434,90	433,20	436,70	443,90		47,10	46,50	52,10	50,40 53,50
	422,50	435,50	433,30	439,20	445,50		49,00	48,60	52,10	49,50 53,80
	428,80	436,30	433,70	438,30	444,10		48,20	46,90	52,20	49,30 54,90
	428,60	437,10	434,80	437,60	444,90		48,10	47,30	53,00	50,40 54,40
	430,70	437,20	435,00	439,10	443,80		48,60	47,80	53,00	50,30 53,40
	430,80	437,50	436,80	439,00	444,10		48,30	48,10	52,40	50,20 54,10
	427,20	439,40	435,50	439,30	443,60		48,40	47,80	52,30	50,00 53,60
	437,60	440,10	435,00	437,10	441,40		49,20	47,80	52,80	49,80 53,10
	429,90	438,40	436,10	439,80	441,80		48,30	47,70	52,20	49,70 53,00
	430,00	437,70	435,60	440,70	441,50		49,00	47,50	52,70	51,70 53,90
	425,10	438,20	435,10	441,20	442,30		48,60	48,20	52,60	51,00 54,10
	431,30	438,80	434,50	439,30	446,10		48,00	48,10	52,60	50,10 53,40
	432,80	440,90	437,10	440,20	443,70		48,40	47,90	52,80	50,40 53,20
	435,30	440,00	436,10	439,60	442,20		48,80	49,40	52,80	50,40 53,50
	436,60	440,30	434,40	438,00	443,60		48,90	48,40	53,20	51,20 53,10
	445,60	441,20	436,50	437,80	443,50		48,70	48,60	52,70	51,10 54,30

## Anexo 7 – Registo da amostragem do tempo de consumo

**Quadro 10-25 – Dados obtidos durante os 10 minutos de amostragem do tempo consumo de 0,0476 dm<sup>3</sup> de combustível/biocombustível**

Condição de ensaio	Tempo de consumo (segundos)				
	B0	B15.1	B30.1	B15.2	B30.2
<b>I</b>	199,50	216,30	217,40	193,80	237,00
	204,40	197,40	216,90	194,40	230,00
	203,70	194,70	215,70	195,40	157,20
	202,00	194,10		195,60	
<b>II</b>	45,20	40,10	39,10	46,70	40,90
	46,70	40,80	40,00	42,00	47,00
	45,40	41,00	42,80	42,60	42,80
	44,80	41,50	41,60	42,20	41,30
				42,50	
<b>III</b>	28,90	25,00	24,50	25,50	27,40
	28,00	25,70	24,50	25,20	27,30
	28,40	25,10	25,00	25,40	27,40
	28,50	25,10	25,20	25,30	26,50



## Anexo 8 – Resultados do balanço de massa

Quadro 10-26 – Dados obtidos para o balanço de massa realizado (B0, B15.1, B30.1, B15.2 e B30.2)

	B0.I	B0.II	B0.III	B15.1.I	B15.1.II	B15.1.III	B30.1.I	B30.1.II	B30.1.III	B15.2.I	B15.2.II	B15.2.III	B30.2.I	B30.2.II	B30.2.III
<b>PCI (MJ/kg)</b>															
PCI	42,69	42,69	42,69	41,87	41,87	41,87	41,06	41,06	41,06	42,86	42,86	42,86	43,03	43,03	43,03
<b>Análise Elementar (% m/m, base húmida)</b>															
C	86,30	86,30	86,30	85,10	85,10	85,10	83,90	83,90	83,90	86,06	86,06	86,06	85,82	85,82	85,82
H	13,70	13,70	13,70	13,48	13,48	13,48	13,25	13,25	13,25	13,94	13,94	13,94	14,18	14,18	14,18
O	0,00	0,00	0,00	1,43	1,43	1,43	2,85	2,85	2,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Total</b>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<b>Parâmetros Operacionais</b>															
Caudal de combustível (kg/h)	0,71	3,14	5,02	0,72	3,52	5,70	0,68	3,45	5,84	0,72	3,26	5,52	0,69	5,57	5,14
Temperatura do ar à entrada (°C)	32,88	41,11	48,20	37,38	42,59	47,68	43,07	45,37	52,47	34,79	40,58	50,20	40,53	44,90	53,57
Temperatura do ar ambiente (°C)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
Temperatura de referência (°C)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HR (%)	0,30	0,20	0,17	0,23	0,22	0,20	0,19	0,18	0,16	0,27	0,21	0,18	0,20	0,19	0,17

**Quadro 10-27 - Dados obtidos para o balanço de massa realizado (B0, B15.1, B30.1, B15.2 e B30.2) (continuação)**

	B0.I	B0.II	B0.III	B15.1.I	B15.1.II	B15.1.III	B30.1.I	B30.1.II	B30.1.III	B15.2.I	B15.2.II	B15.2.III	B30.2.I	B30.2.II	B30.2.III
Ponto de saturação da água a (kgH <sub>2</sub> O/kgAr)															
Humidade do ar ambiente (kg de H <sub>2</sub> O/kg de ar seco)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
O <sub>2</sub> nos gases de escape (%)	17,65	14,83	10,10	17,62	14,65	9,97	17,91	14,71	10,02	17,88	14,84	9,98	17,64	14,74	9,98
Excesso de ar (%)	560,94	248,30	94,37	554,15	238,20	92,01	618,51	241,70	92,92	612,28	248,98	92,28	558,13	243,06	92,31
<b>Entrada no Sistema</b>															
Por via do Combustível (kg/h)															
C	0,61	2,71	4,33	0,61	3,00	4,85	0,57	2,89	4,90	0,62	2,80	4,75	0,60	4,78	4,41
H	0,10	0,43	0,69	0,10	0,47	0,77	0,09	0,46	0,77	0,10	0,45	0,77	0,10	0,79	0,73
O	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,08	0,02	0,10	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Humidade	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Total (kg/h)</b>	0,71	3,14	5,02	0,72	3,52	5,70	0,68	3,45	5,84	0,72	3,26	5,52	0,69	5,57	5,14
O <sub>2</sub> estequiométrico (kg/h)	2,40	10,65	17,04	2,39	11,73	19,00	2,21	11,26	19,10	2,47	11,11	18,81	2,38	19,05	17,59
Ar estequiométrico (kg/h)	10,41	46,31	74,09	10,41	51,01	82,61	9,60	48,97	83,04	10,74	48,32	81,80	10,33	82,83	76,46
Ar adicional (kg/h)	58,42	114,99	69,92	57,67	121,52	76,01	59,37	118,35	77,16	65,75	120,30	75,48	57,65	201,32	70,58
Ar seco total (kg/h)	68,83	161,29	144,02	68,07	172,53	158,63	68,96	167,32	160,19	76,49	168,61	157,28	67,98	284,14	147,05
Humidade no ar (kg/h)	0,65	1,58	1,87	0,54	1,81	2,17	0,74	2,01	2,00	0,76	1,60	2,20	0,00	0,00	0,00
Ar húmido total (kg/h)	69,49	162,88	145,89	68,62	174,34	160,80	69,70	169,33	162,19	77,25	170,22	159,48	67,98	284,14	147,05

**Quadro 10-28 - Dados obtidos para o balanço de massa realizado (B0, B15.1, B30.1, B15.2 e B30.2) (continuação)**

	B0.I	B0.II	B0.III	B15.1.I	B15.1.II	B15.1.III	B30.1.I	B30.1.II	B30.1.III	B15.2.I	B15.2.II	B15.2.III	B30.2.I	B30.2.II	B30.2.III
<b>Caudal máximo de emissão</b>															
CO <sub>2</sub> (kg/h)	2,23	9,92	15,87	2,24	10,98	17,79	2,08	10,60	17,97	2,29	10,28	17,41	2,18	17,51	16,17
O <sub>2</sub> (kg/h)	12,85	25,04	14,42	12,77	26,29	15,47	12,98	25,34	15,80	14,44	26,24	15,40	13,26	46,30	16,23
SO <sub>2</sub> (kg/h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H <sub>2</sub> O(kg/h)	1,52	5,45	8,06	1,42	6,08	9,09	1,54	6,12	8,97	1,67	5,69	9,12	0,89	7,10	6,56
N <sub>2</sub> (kg/h)	53,00	124,20	110,89	52,42	132,85	122,14	53,10	128,84	123,35	58,89	129,83	121,10	52,34	218,79	113,23
<b>Total (kg/h)</b>	69,61	164,61	149,24	68,84	176,20	164,49	69,70	170,89	166,09	77,29	172,05	163,04	68,67	289,71	152,19
Gases secos reais de combustão (kg/h)	68,09	159,16	141,18	67,43	170,12	155,40	68,16	164,77	157,12	75,62	166,36	153,92	67,78	282,61	145,63
ERRO DO BALANÇO (kg/h)	-0,58	-1,41	-1,66	-0,49	-1,66	-2,01	-0,67	-1,88	-1,94	-0,68	-1,42	-1,96	0,00	0,00	0,00
CO <sub>2</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	1,15	5,12	8,19	1,16	5,67	9,18	1,07	5,47	9,28	1,18	5,31	8,98	1,13	9,04	8,34
O <sub>2</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	6,63	12,92	7,44	6,59	13,57	7,99	6,70	13,08	8,16	7,45	13,55	7,95	6,84	23,90	8,38
SO <sub>2</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H <sub>2</sub> O(Nm <sup>3</sup> /h)	0,79	2,81	4,16	0,73	3,14	4,69	0,80	3,16	4,63	0,86	2,94	4,71	0,46	3,67	3,38
N <sub>2</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	27,36	64,10	57,23	27,05	68,57	63,04	27,41	66,50	63,66	30,40	67,01	62,51	27,01	112,92	58,44
<b>Total Gás Seco (Nm<sup>3</sup>/h)</b>	35,14	82,15	72,87	34,80	87,81	80,21	35,18	85,04	81,10	39,03	85,86	79,44	34,99	145,86	75,16
<b>Total Gás Húmido (Nm<sup>3</sup>/h)</b>	35,93	84,96	77,03	35,53	90,94	84,90	35,98	88,20	85,73	39,89	88,80	84,15	35,44	149,53	78,55

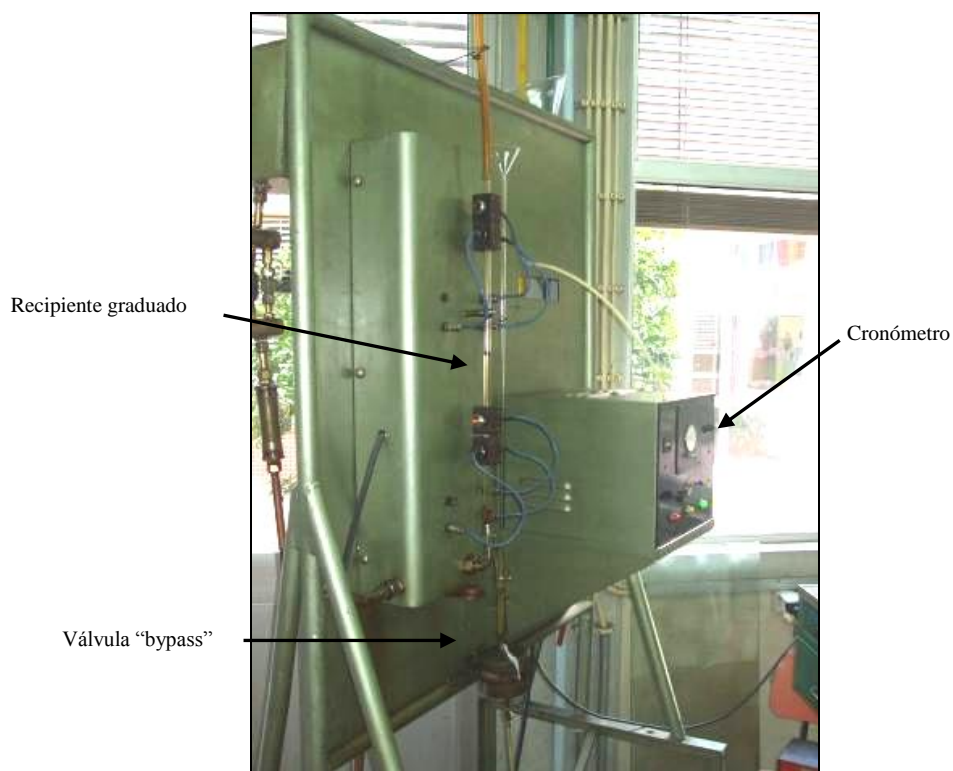
## Anexo 9 – Registo fotográfico



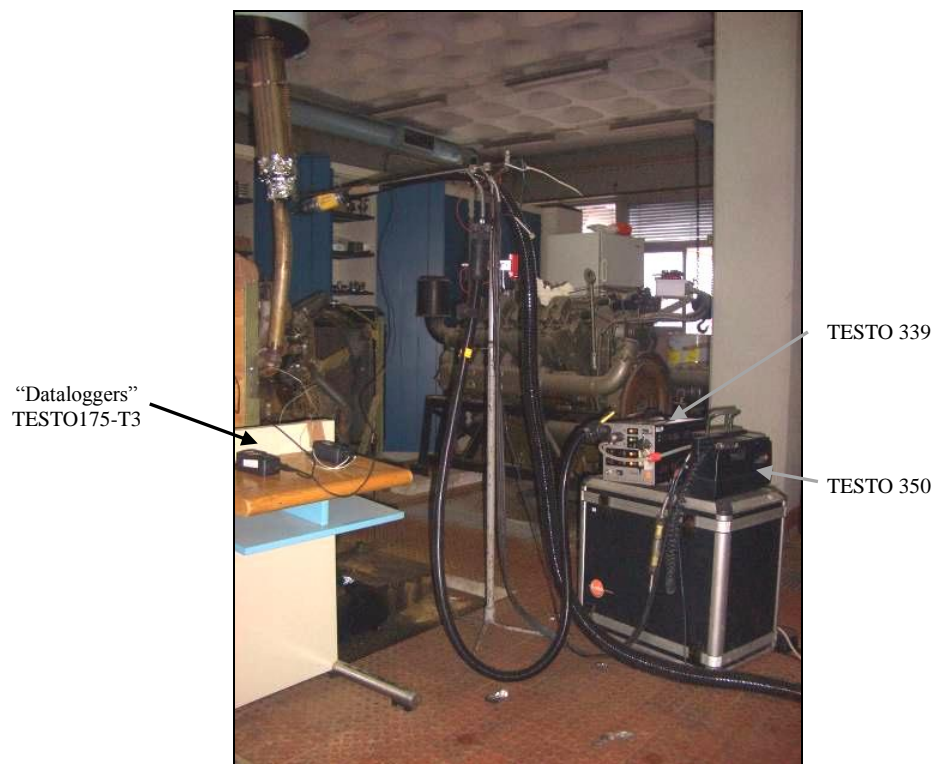
**Figura 10.1 - Motor de combustão interna por compressão utilizado neste trabalho (OM615.940)**



**Figura 10.2 – Dinamómetro e banco de controlo da velocidade e binário**



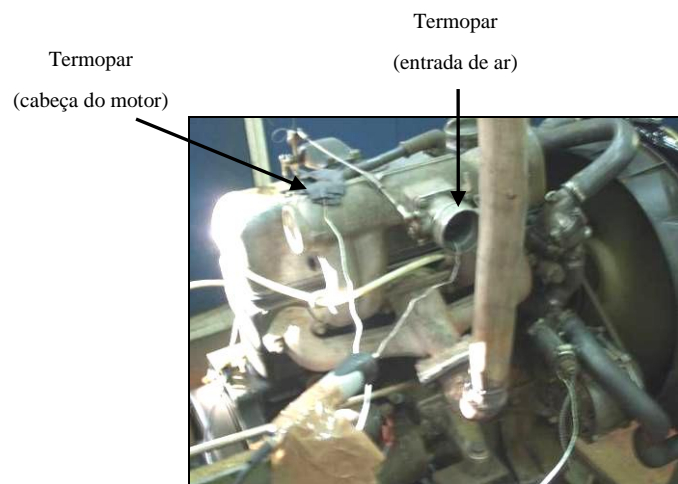
**Figura 10.3 – Sistema de medição do consumo**



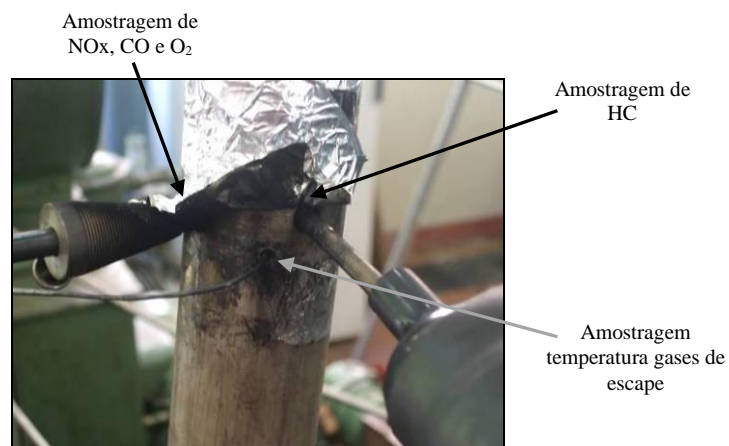
**Figura 10.4 - Equipamento utilizado na amostragem de gases (NO<sub>x</sub>, CO e O<sub>2</sub>) e temperatura (gases de escape, cabeça do motor e entrada de ar no motor)**



**Figura 10.5 - Equipamento utilizado na amostragem de HC**



**Figura 10.6 - Localização dos termopares de medição da temperatura (cabeça do motor e entrada de ar)**



**Figura 10.7 - Pormenor do local de amostragem de gases (NOx, CO, HC e O<sub>2</sub>) e temperatura dos gases de escape**

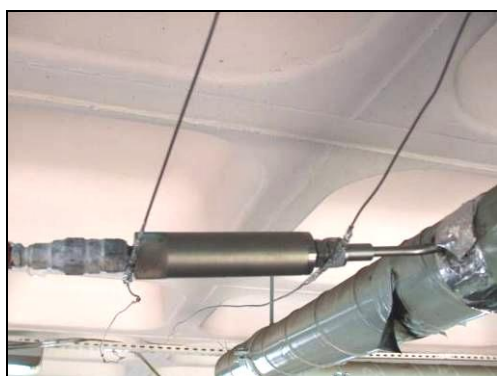


**Figura 10.8 - Localização dos pontos de amostragem no âmbito da recolha de PTS**





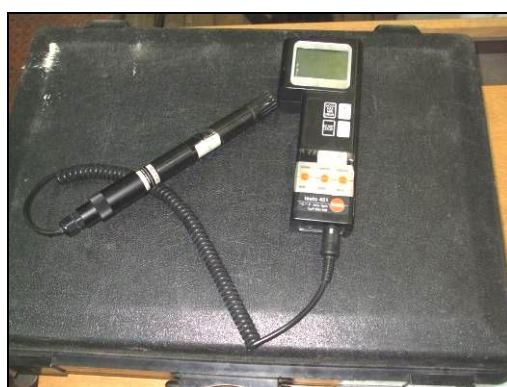
**Figura 10.9 – Equipamento utilizado na recolha de amostras de PTS**



**Figura 10.10 – Porta-filtros no ponto recolha de PTS**



**Figura 10.11 - Sonda e filtro utilizado na recolha de PTS**



**Figura 10.12 – Equipamento utilizado na medição da humidade relativa no local de entrada de ar no motor (TESTO 451)**